

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN  
PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Estrategias de transmisión en modo “half-duplex” para “relays”**

**AUTOR: PALOMA VAQUERO QUINTANA**

**TUTOR: MATILDE SÁNCHEZ FERNÁNDEZ**

**18 de Mayo de 2009**



TÍTULO:     *Estrategias de transmisión en modo “half-duplex” para “re-lays”.*

AUTOR:     *Paloma Vaquero Quintana*

TUTOR:     *Matilde Sánchez Fernández*

La defensa del presente Proyecto Fin de Carrera se realizó el día 18 de Mayo de 2009; siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE:     *Francisco Javier González Serrano*

SECRETARIO     *Marcelino Lázaro Teja*

VOCAL             *Julio Villena Román*

Habiendo obtenido la siguiente calificación:

CALIFICACIÓN:

**Presidente**

**Secretario**

**Vocal**



## Agradecimientos

En este proyecto quiero agradecerle, Mati, el apoyo que me has dado no sólo durante toda la realización del proyecto sino también en las asignaturas que me has impartido. Sin duda alguna, eres la profesora que más huella ha dejado en mí, no sólo por tu profesionalidad sino también por tu carácter, tu constante ánimo y confianza. Gracias a tí, la realización del proyecto ha sido la culminación perfecta de la carrera.

A mi familia, especialmente a mis padres y mi hermano, por todo lo que me habéis aguantado en las épocas más difíciles (ya sabéis el carácter que se me ponía...). Gracias por vuestro apoyo y cariño infinito, sin vosotros no lo hubiera conseguido. Gracias abuelos por vuestra confianza en mí (y por cuando iba a veros y decíais ¡hombre!, ¡la ingeniera!)

Sergio, desde luego tú también has tenido una paciencia infinita, gracias por todo tu apoyo. Aún sigo pensando que las cosas ocurren porque así tienen que ser, por ello, cuando vine a esta Universidad pensé que no tenía sentido, pero gracias a ello y alguna que otra ayuda, te acabé conociendo... Espero que continúes haciéndome feliz, muchas gracias por todo.

A todos los amigos de la Universidad, no hace falta hacer enumeraciones; porque gracias a vosotros me habéis ayudado a ir dando cada paso de este camino que por fin llega a su fin. Agradeceros todos los momentos que hemos disfrutado juntos.



# Resumen

Las principales características del medio inalámbrico son: su naturaleza de difusión y su capacidad para alcanzar diversidad a través de canales independientes. A pesar de que la comunicación de difusión es considerada frecuentemente como un inconveniente (debido a que podrían producirse interferencias mutuas en la red), prima sobre esto último la ventaja de que la señal, una vez transmitida, puede ser recibida (y posteriormente enviada) por múltiples terminales. Para conseguir diversidad espacial sin tener que utilizar múltiples antenas en el mismo nodo, se recurre a la comunicación cooperativa con relays [1] (*cooperative communication*) o también llamada transmisión asistida por relay (*relay-assisted transmission*). En general, los sistemas de comunicación cooperativa con relays tienen un nodo fuente que envían un mensaje a un cierto número de relays cooperativos (es decir, asisten a la fuente), los cuales a su vez reenvían una versión procesada de dicha señal hacia el nodo destino. El nodo destino *combina* las señales recibidas desde los relays e incluso desde la fuente; actuando de esta manera, la diversidad inherente del canal relay es aprovechada en su totalidad.

El paradigma de la comunicación cooperativa se puede asociar a los pioneros trabajos de Van der Meulen [2] y Cover y El Gamal [3]. Existen diversas categorías o estrategias de comunicaciones cooperativas, entre ellas destacan: *amplifica y retransmite* (AF) y *decodifica y retransmite* (DF). Bajo AF, el relay realiza una operación lineal sobre la señal que recibe y después la envía al destino; bajo DF, el relay decodifica la señal recibida, la vuelve a codificar y la envía al destino. En ambos casos, se ha demostrado que el uso de relays mejora la tasa de transmisión [4] y/o la diversidad [5] de las redes inalámbricas.

---

Las siguientes reflexiones motivan la realización de este proyecto: En una red cooperativa con relays, ¿qué estrategia debería ser empleada?, ¿realmente se puede mejorar la capacidad de la transmisión directa?, ¿utilizándose más de un relay podría aumentarse la capacidad? Como es lógico, las respuestas dependen de la topología de la red. Por ejemplo, si se considera una red compuesta por una fuente, un relay y un destino; en el caso de situar el relay cerca del destino, DF podría ser la mejor opción si en la decodificación no se cometieran errores; pero, si el relay se situara cerca de la fuente, la *relación señal a ruido* (SNR) recibida podría resultar aceptable y AF sería la mejor opción. Sin embargo, establecer cuál es el modo de operación óptimo de relays es más complejo que proporcionar una regla general.

De este modo, el proyecto comienza introduciendo el concepto de relays en redes inalámbricas junto con su estado del arte, seguido de una descripción de los diferentes escenarios que van a ser estudiados. Se analiza el impacto de la utilización de relays dentro de dicho tipo de red, en términos de capacidad. El análisis de los resultados demuestra que no se trata de un problema cerrado, es decir, han de tenerse en cuenta una variedad de parámetros como: la potencia a transmitir, la posición de los relays, los instantes temporales de transmisión de señal ...



# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>21</b>
1.1. Canal relay (Relay channel)	23
1.2. Estrategias para relays	23
1.3. Escenarios	24
<b>2. ESCENARIO I</b>	<b>27</b>
2.1. AF	27
2.2. DF	29
2.3. Resultados numéricos entorno sin desvanecimiento	32
2.3.1. Capacidad y potencia	32
2.3.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad	33
2.3.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad	35
2.4. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	40
2.4.1. Capacidad y potencia	40
2.4.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad	41
2.4.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad	42
<b>3. ESCENARIO II</b>	<b>47</b>
3.1. AF	47
3.2. DF	49
3.3. Resultados numéricos entorno sin desvanecimiento	50
3.3.1. Capacidad y potencia	50

3.3.2.	Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad . . . . .	51
3.3.3.	Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad . . . . .	52
3.4.	Resultados numéricos entorno con desvanecimiento . . . . .	56
3.4.1.	Capacidad y potencia . . . . .	56
3.4.2.	Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad . . . . .	57
3.4.3.	Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad . . . . .	57
<b>4.</b>	<b>ESCENARIO III</b>	<b>61</b>
4.1.	AF . . . . .	61
4.2.	DF . . . . .	63
4.3.	Resultados numéricos entorno sin desvanecimiento . . . . .	65
4.3.1.	Capacidad y potencia . . . . .	65
4.3.2.	Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad . . . . .	66
4.3.3.	Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad . . . . .	67
4.4.	Resultados numéricos entorno con desvanecimiento . . . . .	71
4.4.1.	Capacidad y potencia . . . . .	71
4.4.2.	Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad . . . . .	72
4.4.3.	Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad . . . . .	72
<b>5.</b>	<b>ESCENARIO IV</b>	<b>77</b>
5.1.	AF . . . . .	77
5.2.	DF . . . . .	79
5.3.	Resultados numéricos entorno sin desvanecimiento . . . . .	80
5.3.1.	Capacidad y potencia . . . . .	80
5.3.2.	Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad . . . . .	81
5.3.3.	Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad . . . . .	82
5.4.	Resultados numéricos entorno con desvanecimiento . . . . .	86
5.4.1.	Capacidad y potencia . . . . .	86
5.4.2.	Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad . . . . .	87
5.4.3.	Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad . . . . .	87
<b>6.</b>	<b>MÚLTIPLES RELAYS</b>	<b>91</b>
6.1.	Escenarios . . . . .	92

<b>7. 2 RELAYS: RECEPTOR SUMA SEÑALES EN AMPLITUD</b>	<b>97</b>
7.1. ESCENARIO I'	97
7.1.1. AF	97
7.1.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	101
7.2. ESCENARIO II'	107
7.2.1. AF	107
7.2.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	110
7.3. ESCENARIO III'	115
7.3.1. AF	115
7.3.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	118
7.4. ESCENARIO IV'	123
7.4.1. AF	123
7.4.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	126
<b>8. 2 RELAYS. RECEPTOR SUMA SEÑALES EN POTENCIA</b>	<b>131</b>
8.1. ESCENARIO I''	131
8.1.1. AF	131
8.1.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	134
8.2. ESCENARIO II''	140
8.2.1. AF	140
8.2.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	142
8.3. ESCENARIO III''	147
8.3.1. AF	147
8.3.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	149
8.4. ESCENARIO IV''	154
8.4.1. AF	154
8.4.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento	156
<b>9. CONCLUSIONES</b>	<b>161</b>
9.1. 1 RELAY	162
9.1.1. Capacidad VS Potencia con desvanecimiento	162
9.1.2. Capacidad VS Posición con desvanecimiento	166

9.2. 2 RELAYS MODO AF:	
RECEPTOR SUMA EN AMPLITUD . . . . .	170
9.2.1. Capacidad VS Potencia con desvanecimiento . . . . .	170
9.2.2. Capacidad VS Posición con desvanecimiento . . . . .	172
9.3. 2 RELAYS MODO AF:	
RECEPTOR SUMA EN POTENCIA . . . . .	174
9.3.1. Capacidad VS Potencia con desvanecimiento . . . . .	174
9.3.2. Capacidad VS Posición con desvanecimiento . . . . .	176
9.4. TRABAJOS FUTUROS . . . . .	178
<b>APÉNDICES</b>	<b>181</b>
<b>A. Capacidad de canal</b>	<b>181</b>
<b>B. Capacidad en Transmisión directa sin relay</b>	<b>183</b>
<b>C. Escenario I: Máximos/mínimos un relay, estrategia AF</b>	<b>185</b>
<b>D. Escenario I': Máximos/mínimos dos relays, estrategia AF, suma en amplitud</b>	<b>187</b>
<b>E. Escenario I'': Máximos/mínimos dos relays, estrategia AF, suma en potencia</b>	<b>189</b>

# Lista de Figuras

1.1. Ejemplo de posibles escenarios para distintos tipos de relays . . . . .	22
1.2. Canal relay con tres nodos de comunicación . . . . .	23
1.3. Escenario I . . . . .	25
1.4. Escenario II . . . . .	25
1.5. Escenario III . . . . .	26
1.6. Escenario IV . . . . .	26
2.1. Escenario I . . . . .	27
2.2. Canal relay . . . . .	30
2.3. Capacidad VS Potencia Escenario I, sin desvanecimiento . . . . .	33
2.4. Capacidad VS Distancia Escenario I, sin desvanecimiento . . . . .	34
2.5. Capacidad VS Distancia Escenario I modo AF, sin desvanecimiento . . . . .	36
2.6. Capacidad VS Distancia Escenario I modo DF, sin desvanecimiento . . . . .	37
2.7. Capacidad VS Distancia Escenario I, exponente de pérdidas . . . . .	38
2.8. Capacidad VS Distancia Escenario I, sin desvanecimiento . . . . .	39
2.9. Capacidad VS Potencia Escenario I, con desvanecimiento . . . . .	40
2.10. Capacidad VS Distancia Escenario I, con desvanecimiento . . . . .	41
2.11. Capacidad VS Distancia Escenario I modo AF, con desvanecimiento . . . . .	42
2.12. Capacidad VS Distancia Escenario I modo DF, con desvanecimiento . . . . .	43
2.13. Capacidad VS Distancia Escenario I, exponente de pérdidas, desvanecimiento . . . . .	44
2.14. Capacidad VS Distancia Escenario I, con desvanecimiento . . . . .	45
3.1. Escenario II . . . . .	47

3.2. Capacidad VS SNR Escenario II, sin desvanecimiento . . . . .	50
3.3. Capacidad VS Distancia Escenario II, sin desvanecimiento . . . . .	51
3.4. Capacidad VS Distancia Escenario II modo AF, sin desvanecimiento . . . . .	52
3.5. Capacidad VS Distancia Escenario II, exponente de pérdidas . . . . .	54
3.6. Capacidad VS Distancia Escenario II, sin desvanecimiento . . . . .	55
3.7. Capacidad VS SNR Escenario II, con desvanecimiento . . . . .	56
3.8. Capacidad VS Distancia Escenario II, con desvanecimiento . . . . .	57
3.9. Capacidad VS Distancia Escenario II modo AF, con desvanecimiento . . . . .	58
3.10. Capacidad VS Distancia Escenario II, exponente de pérdidas, desvanecimiento . .	59
3.11. Capacidad VS Distancia Escenario II, con desvanecimiento . . . . .	60
4.1. Escenario III . . . . .	61
4.2. Capacidad VS SNR Escenario III, sin desvanecimiento . . . . .	65
4.3. Capacidad VS Distancia Escenario III, sin desvanecimiento . . . . .	66
4.4. Capacidad VS Distancia Escenario III modo AF, sin desvanecimiento . . . . .	67
4.5. Capacidad VS Distancia Escenario III modo DF, sin desvanecimiento . . . . .	68
4.6. Capacidad VS Distancia Escenario III, exponente de pérdidas . . . . .	69
4.7. Capacidad VS Distancia Escenario III, sin desvanecimiento . . . . .	70
4.8. Capacidad VS SNR Escenario III, con desvanecimiento . . . . .	71
4.9. Capacidad VS Distancia Escenario III, con desvanecimiento . . . . .	72
4.10. Capacidad VS Distancia Escenario III modo AF, con desvanecimiento . . . . .	73
4.11. Capacidad VS Distancia Escenario III modo DF, con desvanecimiento . . . . .	74
4.12. Capacidad VS Distancia Escenario III, exponente de pérdidas, desvanecimiento .	75
4.13. Capacidad VS Distancia Escenario III, con desvanecimiento . . . . .	76
5.1. Escenario IV . . . . .	77
5.2. Capacidad VS Potencia Escenario IV, sin desvanecimiento . . . . .	80
5.3. Capacidad VS Distancia Escenario IV, sin desvanecimiento . . . . .	81
5.4. Capacidad VS Distancia Escenario IV modo AF, sin desvanecimiento . . . . .	82
5.5. Capacidad VS Distancia Escenario IV modo DF, sin desvanecimiento . . . . .	83
5.6. Capacidad VS Distancia Escenario IV, exponente de pérdidas . . . . .	84
5.7. Capacidad VS Distancia Escenario IV, sin desvanecimiento . . . . .	85
5.8. Capacidad VS Potencia Escenario IV, con desvanecimiento . . . . .	86

5.9. Capacidad VS Distancia Escenario IV, con desvanecimiento . . . . .	87
5.10. Capacidad VS Distancia Escenario IV modo AF, con desvanecimiento . . . . .	88
5.11. Capacidad VS Distancia Escenario IV modo DF, con desvanecimiento . . . . .	88
5.12. Capacidad VS Distancia Escenario IV, exponente de pérdidas, desvanecimiento . . . . .	89
5.13. Capacidad VS Distancia Escenario IV, con desvanecimiento . . . . .	90
6.1. Escenario I' . . . . .	92
6.2. Escenario II' . . . . .	93
6.3. Escenario III' . . . . .	94
6.4. Escenario IV' . . . . .	95
7.1. Escenario I' . . . . .	98
7.2. Capacidad VS Potencia Escenario I', con desvanecimiento . . . . .	101
7.3. Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento . . . . .	102
7.4. Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento . . . . .	103
7.5. Capacidad VS Distancia Escenario I', exponente de pérdidas, desvanecimiento . . . . .	105
7.6. Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento . . . . .	106
7.7. Escenario II' . . . . .	107
7.8. Capacidad VS Potencia Escenario II', con desvanecimiento . . . . .	110
7.9. Capacidad VS Distancia Escenario II', con desvanecimiento . . . . .	111
7.10. Capacidad VS Distancia Escenario II', con desvanecimiento . . . . .	112
7.11. Capacidad VS Distancia Escenario II', exponente de pérdidas, desvanecimiento . . . . .	113
7.12. Capacidad VS Distancia Escenario II', con desvanecimiento . . . . .	114
7.13. Escenario III' . . . . .	115
7.14. Capacidad VS Potencia Escenario III', con desvanecimiento . . . . .	118
7.15. Capacidad VS Distancia Escenario III', con desvanecimiento . . . . .	119
7.16. Capacidad VS Distancia Escenario III', con desvanecimiento . . . . .	120
7.17. Capacidad VS Distancia Escenario II', exponente de pérdidas, desvanecimiento . . . . .	121
7.18. Capacidad VS Distancia Escenario III', con desvanecimiento . . . . .	122
7.19. Escenario IV' . . . . .	123
7.20. Capacidad VS Potencia Escenario IV', con desvanecimiento . . . . .	126
7.21. Capacidad VS Distancia Escenario IV', con desvanecimiento . . . . .	127
7.22. Capacidad VS Distancia Escenario IV', con desvanecimiento . . . . .	128

7.23. Capacidad VS Distancia Escenario IV', exponente de pérdidas, desvanecimiento .	129
7.24. Capacidad VS Distancia Escenario IV', con desvanecimiento . . . . .	130
8.1. Escenario I' . . . . .	132
8.2. Capacidad VS Potencia Escenario I', con desvanecimiento . . . . .	134
8.3. Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento . . . . .	135
8.4. Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento . . . . .	137
8.5. Capacidad VS Distancia Escenario IV', exponente de pérdidas, desvanecimiento .	138
8.6. Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento . . . . .	139
8.7. Escenario II" . . . . .	140
8.8. Capacidad VS Potencia Escenario II", con desvanecimiento . . . . .	142
8.9. Capacidad VS Distancia Escenario II", con desvanecimiento . . . . .	143
8.10. Capacidad VS Distancia Escenario II", con desvanecimiento . . . . .	144
8.11. Capacidad VS Distancia Escenario II", exponente de pérdidas, desvanecimiento .	145
8.12. Capacidad VS Distancia Escenario II", con desvanecimiento . . . . .	146
8.13. Escenario III" . . . . .	147
8.14. Capacidad VS Potencia Escenario III", con desvanecimiento . . . . .	149
8.15. Capacidad VS Distancia Escenario III", con desvanecimiento . . . . .	150
8.16. Capacidad VS Distancia Escenario III", con desvanecimiento . . . . .	151
8.17. Capacidad VS Distancia Escenario III", exponente de pérdidas, desvanecimiento .	152
8.18. Capacidad VS Distancia Escenario III", con desvanecimiento . . . . .	153
8.19. Escenario IV" . . . . .	154
8.20. Capacidad VS Potencia Escenario IV", con desvanecimiento . . . . .	156
8.21. Capacidad VS Distancia Escenario IV", con desvanecimiento . . . . .	157
8.22. Capacidad VS Distancia Escenario IV", con desvanecimiento . . . . .	158
8.23. Capacidad VS Distancia Escenario IV", exponente de pérdidas, desvanecimiento .	159
8.24. Capacidad VS Distancia Escenario IV", con desvanecimiento . . . . .	160
9.1. Capacidad VS SNR, relay AF, con desvanecimiento . . . . .	163
9.2. Capacidad VS SNR, relay DF, con desvanecimiento . . . . .	164
9.3. Capacidad VS Distancia, relay AF, con desvanecimiento . . . . .	166
9.4. Capacidad VS Distancia, relay DF, con desvanecimiento . . . . .	168
9.5. Capacidad VS SNR, 2 relays AF, con desvanecimiento . . . . .	170



9.6. Capacidad VS SNR, 2 relays AF, con desvanecimiento . . . . .	171
9.7. Capacidad VS Distancia, relay AF, con desvanecimiento . . . . .	172
9.8. Capacidad VS SNR, 2 relays AF, con desvanecimiento . . . . .	174
9.9. Capacidad VS SNR, 2 relays AF, con desvanecimiento . . . . .	175
9.10. Capacidad VS Distancia, relay AF, con desvanecimiento . . . . .	176
B.1. Transmisión directa . . . . .	183



# Lista de Tablas

9.1. Resumen capacidad 1 relay . . . . .	169
9.2. Resumen capacidad 2 relays, receptor suma en amplitud . . . . .	173
9.3. Resumen capacidad 2 relays, receptor suma en potencia . . . . .	177



# INTRODUCCIÓN

El estándar IEEE 802.16e, coloquialmente conocido como WiMAX (World Interoperability for Microwave Access)[6], hace referencia a sistemas de acceso inalámbricos de banda ancha. Tanto WiMAX como el resto de los sistemas inalámbricos padecen de los inconvenientes proporcionados por los mecanismos de propagación radio; entre ellos, la disminución de la relación señal a ruido (SNR) y de la tasa de datos conforme la distancia entre emisor y receptor aumenta.

Debido a las tasas de datos y anchos de banda requeridos por WiMAX [7] resulta necesario tener en cuenta algunos aspectos. En primer lugar, la cobertura que puede ofrecer una estación base (BS) dentro de una celda de comunicación puede disminuir en situaciones en las que no haya visión directa (NLOS) tales como desvanecimiento por obstáculos debido a mobiliario urbano. En segundo lugar, la necesidad ocasional requerida para proporcionar conectividad inalámbrica en áreas que están fuera del alcance de las BS.

Estos problemas podrían ser solventados aumentando el número de BS; sin embargo, esta opción puede resultar cara e ineficiente. Así surgen los *relays* (repetidores)<sup>1</sup> WiMAX, intentando proporcionar una solución alternativa que aumente la capacidad (ver Apéndice A), rangos de cobertura y calidad de servicio (QoS) disminuyendo costes de manera efectiva [8]. Así IEEE 802.16j [9] ha sido creado para ampliar el ámbito de IEEE 802.16e y permitir redes móviles multisalto con relays (MMR).

Esta tecnología resulta idónea en entornos rurales (donde la intensidad de tráfico es baja y hay poca población), en mercados emergentes y en escenarios donde se producen desastres/urgencias

---

<sup>1</sup>De aquí en adelante, cada vez que se quiera hacer referencia a un elemento repetidor se va a emplear el término relay.

de manera espontánea, tal y como se puede apreciar en la Figura 1.1 [10]:

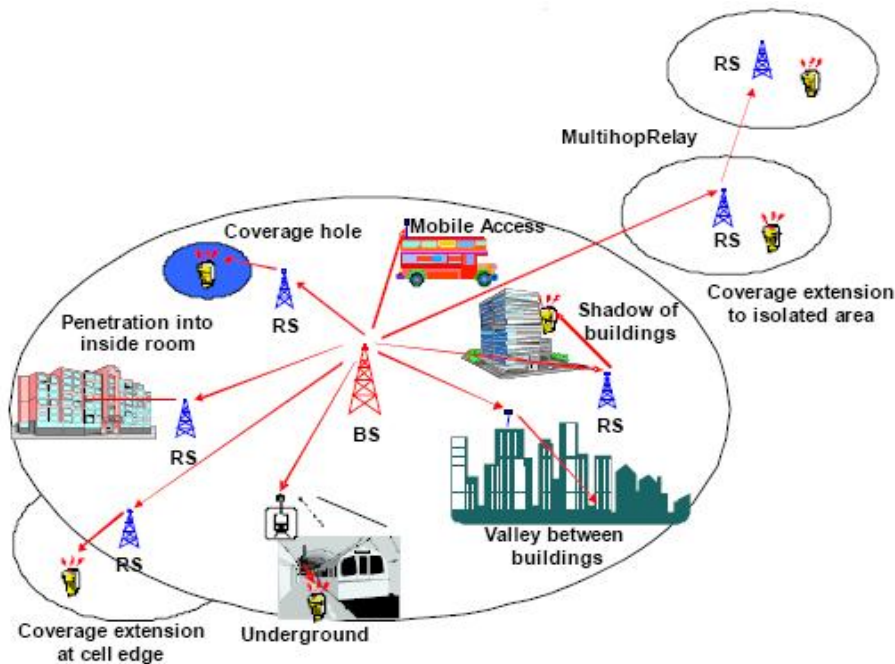


Figura 1.1: Ejemplo de posibles escenarios para distintos tipos de relays

Mientras las redes celulares convencionales tienen unos diámetros de 2-5 km en cada celda, un relay puede cubrir una región con un diámetro de 200-500 m. Esto significa que los requisitos de potencia a transmitir por cada relay son significativamente inferiores a los de las BS. Esto permite diseños económicos de amplificadores utilizados en los relays. Incluso, los mástiles sobre los que se ubican los relays no tienen por qué ser tan altos como los de las BS, lo cual reduce costes de mantenimiento.

Si la densidad de relays en una celda es moderadamente elevada, la mayoría de los terminales estarán significativamente más próximos a uno o más relays que a las BS. Esto implica que las pérdidas de propagación desde la BS hacia el terminal sean mayores que las que se producen entre el relay y el terminal. Esto produce tasas de datos mayores en los enlaces entre relays y terminales, de esta manera, se podrían solucionar problemas de cobertura en celdas de gran tamaño.

Dado que es posible tener transmisiones simultáneas por las BS y los relays, las capacidades que se pueden alcanzar se ven incrementadas utilizando la diversidad espacial.

## 1.1. Canal relay (Relay channel)

El esquema clásico de canal relay, introducido en 1971 por Van der Meulen [2], ha sido recuperado de nuevo debido a su potencial en sistemas inalámbricos. El modelo está formado por tres nodos de comunicación inalámbricos [Figura 1.2]: fuente, destino y relay, en el que la fuente quiere transmitir información hacia el destino.

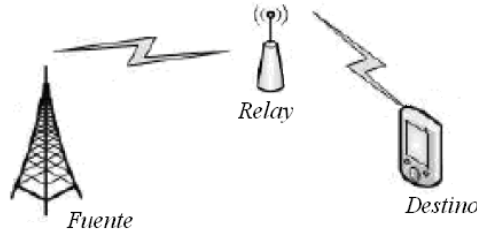


Figura 1.2: Canal relay con tres nodos de comunicación

En el escenario que se plantea estudiar, el relay va a trabajar en modo *half-duplex* o también llamado *canal relay barato* (cheap relay channel) ya que no es capaz de recibir y transmitir simultáneamente sobre el mismo canal de frecuencia o *slot* temporal (*Time Slot*, TS), entonces se dice que va a existir duplexado ortogonal en tiempo o frecuencia. *Half-duplex* resulta más práctico que *full-duplex* ya que éste es más caro (debido a , entre otros, la diferencia de niveles de potencia transmitida y recibida). En el cálculo de la capacidad del canal entre fuente y destino se van a combinar los conceptos: canal de acceso múltiple (Multiple Access Channel, MAC) para la comunicación de la fuente y el relay con el destino; y canal de difusión (Broadcast Channel, BC) para la comunicación de la fuente con el relay y el destino. Hay que destacar que el canal relay es un caso especial de *canal físicamente degradado* estudiado en [11].

## 1.2. Estrategias para relays

Diversas son las clasificaciones realizadas para relays [12], pero en nuestro estudio resulta relevante la empleada según sea la estrategia de procesamiento de información:

- DF (Decodifica y retransmite)

El relay decodifica la señal recibida de la fuente, la vuelve a codificar y la reenvía hacia el destino. Dado que el relay debería decodificar sin errores el mensaje de la fuente, las tasas alcanzables se encuentran limitadas por la capacidad del canal existente entre la fuente y el relay. Por tanto, si el canal que hay entre fuente y destino es “mejor” que el de la fuente y el relay; el relay no será capaz de mejorarla transmisión, esto es, DF funcionaría peor que la transmisión directa.

- AF (Amplifica y retransmite)

El relay amplifica y retransmite la señal recibida funcionando como un repetidor analógico, por ello, también se ve aumentado el nivel de ruido. En el caso de que la SNR no sea lo suficientemente elevada y el relay se encuentre próximo al receptor este esquema puede resultar idóneo debido a su baja complejidad. En este caso se ignoran los beneficios de la codificación de canal, sin embargo, se evita la propagación de errores.

- EF (Estima y retransmite)

No se realiza una decodificación, pero sí se cuantifica sobre cada símbolo recibido, siguiendo un esquema de codificación de fuente antes de retransmitir. En este caso la complejidad es alta.

- CF (Comprime y retransmite)

Se cuantifica la señal recibida, a continuación se comprime y retransmite hacia el destino; éste decodifica el mensaje original utilizando la señal recibida por el relay y por la fuente.

### 1.3. Escenarios

Una vez presentados los diversos esquemas de funcionamiento para los relays se va a realizar un estudio comparativo de cuatro escenarios en los que se emplea un único relay en modos AF y DF *half-duplex*.

- ESCENARIO I

En el escenario I la fuente transmite información tanto al relay como al destino en el primer TS; mientras que únicamente el relay se comunicará con el destino en el segundo TS. Este escenario tiene una estructura similar a la de un canal BC durante el primer TS (Fuente  $\rightarrow$  Relay, Destino).



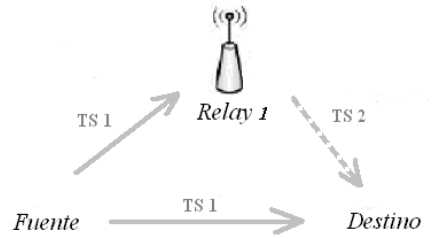


Figura 1.3: Escenario I

#### ■ ESCENARIO II

En el caso del escenario II la fuente se comunica únicamente con el relay durante el primer TS. En el segundo TS tendrá lugar la transferencia de información entre relay-destino, y entre fuente-destino. En esta situación, el escenario tiene una estructura similar a la de un MAC durante el segundo TS (Relay, Fuente  $\rightarrow$  Destino).

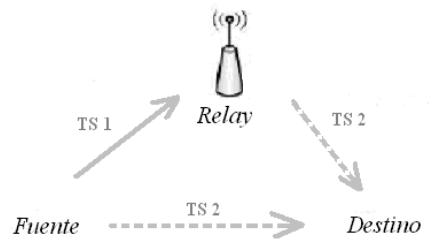


Figura 1.4: Escenario II

#### ■ ESCENARIO III

El escenario III puede verse como la combinación de los dos escenarios anteriores, dado que durante el primer TS habrá comunicación entre fuente-relay y fuente-destino, y en el segundo TS entre relay-destino y fuente-destino. Este escenario tiene una estructura similar a la de un canal BC durante el primer TS (Fuente  $\rightarrow$  Relay, Destino); y a la de un MAC durante el segundo TS (Relay, Fuente  $\rightarrow$  Destino).

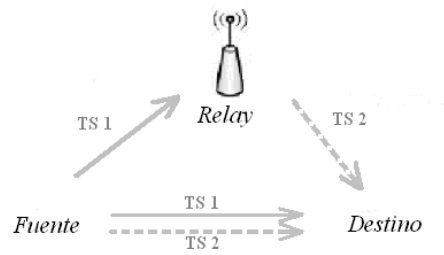


Figura 1.5: Escenario III

#### ■ ESCENARIO IV

Por último, en el escenario IV se va a asumir que no existe transferencia de información desde la fuente hacia el destino de manera directa, así la fuente se comunicará con el relay en el primer TS y en el TS siguiente el relay transmitirá hacia el destino.

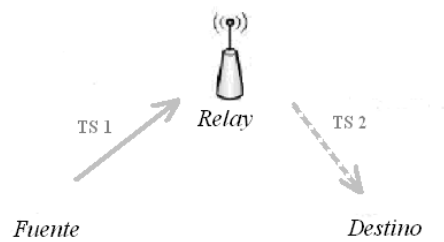


Figura 1.6: Escenario IV

## ESCENARIO I

Este capítulo estudia el primero de los escenarios presentados anteriormente. Se empieza con un análisis teórico de los modos de funcionamiento AF y DF<sup>1</sup> con el fin de calcular la expresión general de la capacidad para cada uno de ellos. A continuación, se particularizarán valores de la capacidad en función de: la potencia emitida por la fuente y el relay, así como la posición del relay; en los casos en los que haya o no desvanecimiento. Por tanto, ésta será la dinámica adoptada en los tres sucesivos capítulos para cada uno de los escenarios presentados.

### 2.1. AF

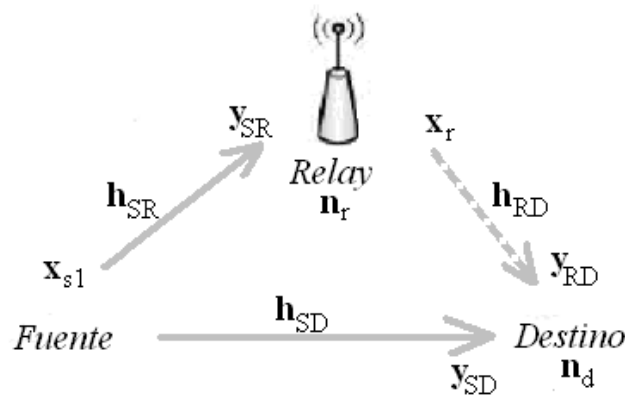


Figura 2.1: Escenario I

---

<sup>1</sup>El relay DF transmitirá la misma señal que recibió de la fuente, suponiendo, por tanto, que el relay no comete errores en la decodificación. A esto se le llama *Repetition Coding* (RC)[13]

La fuente codifica el mensaje  $m$  en una palabra código  $X_{s1}$ . En el primer TS  $X_{s1}$  es modulada en  $x_{s1}$  y enviada hacia el relay y el destino, por tanto, las correspondientes señales recibidas son  $y_{SR}$  e  $y_{SD}$ . A su vez, el relay procesa  $y_{SR}$  y obtiene una palabra código  $X_r$  que es modulada siguiendo un esquema BPSK [14], convirtiéndose en  $x_r$ . Asimismo, el relay transmite dicha señal en el segundo TS hacia el destino, recibiendo éste la señal  $y_{RD}$ .

Tal y como se aprecia en la Figura 2.1;  $h_{SD}$ ,  $h_{SR}$ ,  $h_{RD}$  (ganancias de canal complejo) representan el efecto de las pérdidas en el trayecto o “path-loss” entre los nodos S (fuente) y D (destino), S y R (relay), R y D, respectivamente<sup>2</sup>. Por otro lado,  $n_{d1}$ ,  $n_{d2}$  y  $n_r$  representan el ruido aditivo blanco Gaussiano de media nula y varianzas  $\sigma_{d1}^2$ ,  $\sigma_{d2}^2$  y  $\sigma_r^2$  en los nodos D y R.

De manera esquemática se puede resumir:

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR} = h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r \quad (2.1)$$

$$y_{SD} = h_{SD} \cdot x_{s1} + n_{d1} \quad (2.2)$$

En el segundo TS el relay transmite la señal  $x_r$ , entonces la señal recibida en el destino,  $y_{RD}$ , resulta:

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_{RD} = h_{RD} \cdot x_r + n_{d2} \quad (2.3)$$

Dado que la estrategia es AF, el relay se encarga de amplificar la señal recibida por la fuente tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$x_r = f \cdot y_{SR} \quad (2.4)$$

Siendo  $f$  el factor de escalado obtenido a partir de las restricciones iniciales impuestas<sup>3</sup>:

$$P_r = f^2 \left( |h_{SR}|^2 \cdot P_s + \sigma_r^2 \right) \Rightarrow f = \sqrt{\frac{P_r}{|h_{SR}|^2 \cdot P_s + \sigma_r^2}} \quad (2.5)$$

---

<sup>2</sup>Todos los nodos tienen una única antena.

<sup>3</sup>

$$E \{ |x_{s1}|^2 \} \leq P_s \quad E \{ |x_r|^2 \} \leq P_r$$

Tras sustituir el factor de escalado en la Ec. 2.3, la señal recibida en el destino,  $y_{RD}$ , durante el segundo *time slot* queda:

$$y_{RD} = h_{RD} \cdot f \cdot (h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r) + n_{d2} \quad (2.6)$$

Atendiendo a las señales que llegan al nodo D, se pueden escribir las ecuaciones anteriores de manera matricial:

$$\bar{y} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \bar{n} \quad (2.7)$$

$$\begin{pmatrix} y_{SD} \\ y_{RD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{SD} \\ h_{SR} \cdot f \cdot h_{RD} \end{pmatrix} \cdot x_{s1} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ f \cdot h_{RD} & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_r \\ n_d \\ n_d \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Para el cálculo de la capacidad en este escenario se va hacer uso de la siguiente expresión[11]:

$$C = \log_2 \frac{|\bar{R}_y|}{|\bar{R}_n|} = \log_2 \left| \bar{I} + \left( \bar{B} \cdot \bar{R}_n \cdot \bar{B}^H \right)^{-1} \cdot P_s \cdot \bar{A} \cdot \bar{A}^H \right| \quad (2.9)$$

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF1} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{\text{SNR}_{SR} \cdot \text{SNR}_{RD}}{1 + \text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{RD}} \right] \quad (2.10)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los nodos i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_{d1}^2} \quad \text{SNR}_{SR} = \frac{P_s \cdot |h_{SR}|^2}{\sigma_r^2} \quad \text{SNR}_{RD} = \frac{P_r \cdot |h_{RD}|^2}{\sigma_{d2}^2}$$

## 2.2. DF

Tal y como se ha procedido en la estrategia AF, se va a plantear el sistema de ecuaciones que rigen la comunicación entre nodos para el modo de funcionamiento DF (ver Figura 2.1).

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR} = h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r \quad (2.11)$$

$$y_{SD} = h_{SD} \cdot x_{s1} + n_{d1} \quad (2.12)$$

- 2º Time Slot:

$$y_{RD} = h_{RD} \cdot x_r + n_{d2} \quad (2.13)$$

Dado que la implementación escogida para el modo DF es RC, se cumple que:  $x_r = \beta \cdot x_{s1}$ , siendo  $\beta = \sqrt{\frac{P_r}{P_s}}$ . Por tanto, de manera matricial, al igual que en la Ec. 2.7 queda:

$$\begin{pmatrix} y_{SD} \\ y_{RD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{SD} \\ \beta \cdot h_{RD} \end{pmatrix} \cdot x_{s1} + \begin{pmatrix} n_{d1} \\ n_{d2} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Con el fin de obtener la expresión de la capacidad, se va a proceder tal y como se sigue en la mayor parte de la literatura [15], [3] (de manera distinta a como se hizo en el caso AF) gracias a la ayuda de [11]. El canal relay [Figura 2.2] combina el canal de múltiple acceso para el caso de la comunicación de X y  $X_r$  hacia Y; y por otro lado, el canal de difusión desde X hacia Y,  $Y_r$ .

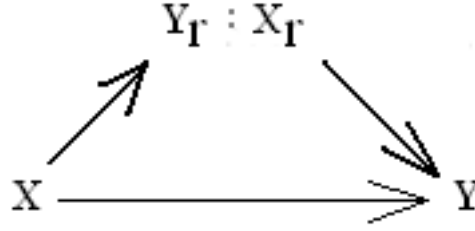


Figura 2.2: Canal relay

A continuación, se desarrolla la expresión de la capacidad para este escenario en modo DF.

- Límite superior de capacidad: Conocido como *max-flow min-cut* o límite *cut-set* [3], que consiste en dos términos:
  - Límite difusión: Se puede establecer una analogía con el caso de diversidad en la que el relay actúa como otro receptor:

$$C \leq \sup \{I(X; Y, Y_r | X_r)\} \quad (2.15)$$

- Límite acceso múltiple: En este caso el relay actúa como transmisor

$$C \leq \sup \{I(X, X_r; Y)\} \quad (2.16)$$

Por tanto, el límite superior queda:

$$C \leq \sup \min \{I(X; Y, Y_r | X_r), I(X, X_r; Y)\} \quad (2.17)$$

- Límite inferior de capacidad: La tasa que se alcanza es:

$$R = \sup \min \{I(X; Y_r | X_r), I(X, X_r; Y)\} \quad (2.18)$$

En DF se alcanza la capacidad del límite superior si  $p(y, y_r | x, x_r) = p(y_r | x, x_r) \cdot p(y | y_r, x_r)$ , esto es, cuando el canal relay es *físicamente degradado*, es decir, el relay recibe una copia “mejor” del mensaje transmitido que el destino. Por tanto,  $I(X; Y, Y_r | X_r) = I(X; Y_r | X_r) \implies$  La tasa obtenida coincide con el límite *cut-set*.

Finalmente, se obtiene que la capacidad para el Escenario I utilizando un relay en modo DF vale:

$$C_{DF1} = \frac{1}{2} \min \{\log_2 (1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}), \log_2 (1 + \text{SNR}_{SR})\} \quad (2.19)$$

### 2.3. Resultados numéricos entorno sin desvanecimiento

El objetivo de este apartado consiste en verificar si, bajo unas determinadas circunstancias, el uso de relays mejora las prestaciones de las redes inalámbricas. De este modo, se van a calcular los valores de la capacidad en diversas simulaciones y para cada una de las estrategias de transmisión expuestas. El parámetro de estudio escogido es la capacidad ya que mide la tasa máxima en la que se puede enviar y recuperar información con una probabilidad de error arbitrariamente baja. En el estudio de cada escenario se va a realizar una comparación entre la capacidad en los modos AF y DF *half-duplex*, así como la capacidad en el escenario en el que no hay relay y la comunicación se realiza directamente entre fuente y destino. (En el Apéndice A se obtiene el valor de la capacidad en dicha transmisión directa).

#### 2.3.1. Capacidad y potencia

En esta primera simulación se va a considerar que la separación entre cada uno de los nodos vale 0.5<sup>4</sup>, modelando las pérdidas en el trayecto como:  $h_{SR} = \sqrt{\frac{1}{d^\alpha}}$ ,  $h_{RD} = \sqrt{\frac{1}{(d_{SD}-d)^\alpha}}$ ,  $h_{SD} = \sqrt{\frac{1}{d_{SD}^\alpha}}$ , entre los nodos S-R, R-D, S-D, respectivamente, siendo  $\alpha = 4$ . Las varianzas de ruido serán iguales  $\sigma_{d1}^2 = \sigma_{d2}^2 = \sigma_r^2 = 1$  y las potencias transmitidas por la fuente y el relay irán creciendo a la par. De aquí en adelante, en los apartados de resultados numéricos, el término SNR va a hacer referencia al cociente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido.

La Figura 2.3 muestra los resultados obtenidos. Tal y como cabía esperar, conforme el nivel de potencia aumenta la capacidad del sistema aumenta. Se pueden distinguir 3 regiones:

$$\begin{aligned} SNR < 8,5dB &\rightarrow C_{DF} > C_{AF} > C_{directo} \\ 8,5dB < SNR < 11,5dB &\rightarrow C_{DF} > C_{directo} > C_{AF} \\ SNR > 11,5dB &\rightarrow C_{directo} > C_{DF} > C_{AF} \end{aligned}$$

Con lo que se concluye que la capacidad obtenida con un esquema DF es siempre mayor que con uno AF (bajo las condiciones iniciales supuestas). Además, conforme se aumenta la potencia transmitida, la capacidad de este escenario ofrece peores prestaciones al comparar con un enlace directo (sin relays); esto ocurre, en nuestro caso, a partir de los 12dB de SNR. Todo esto es coherente con el hecho de que en la transmisión directa se emplea un sólo TS, mientras que

---

<sup>4</sup>Se asume una normalización de la distancia entre nodos:  $d_{SD} = d = 0,5 = \frac{\text{distancia}}{\text{distancia}_0}$



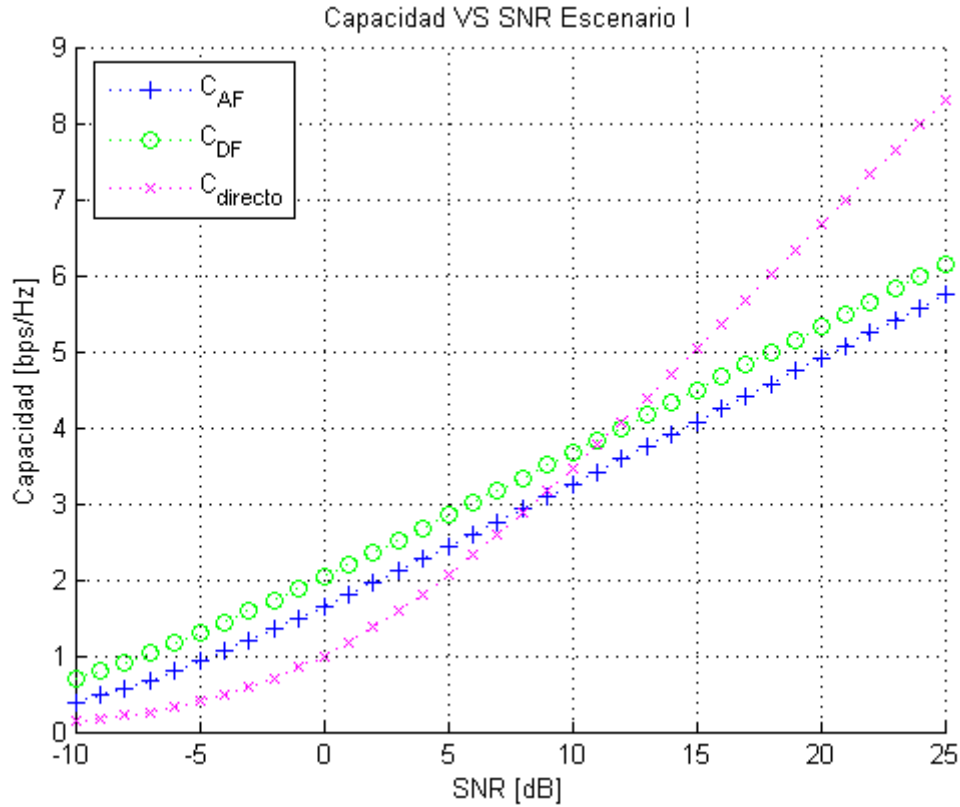


Figura 2.3: Capacidad VS Potencia Escenario I, sin desvanecimiento

en los modos AF y DF se utilizan dos TS, con lo que en las respectivas ecuaciones aparece el logaritmo multiplicado por un factor  $\frac{1}{2}$ .

La tasa de información alcanzable se puede ver reducida debido a diversos factores, entre ellos destacan las pérdidas en el trayecto. Tal y como se ha supuesto, son inversamente proporcionales a la distancia entre transmisor y receptor, elevado a un cierto exponente  $\alpha$ . El siguiente análisis se va a centrar en el estudio de la influencia de dicho exponente de pérdidas según sea la distancia entre los nodos.

### 2.3.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

Se va a simular el caso en el que las potencias emitidas por la fuente y por el relay valgan 1[W], y las varianzas de ruido sean iguales a la unidad. Se va a normalizar a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que el relay se ubique en cualquier posición intermedia de la

recta que une dichos nodos (el parámetro que varía es la distancia entre fuente y relay, dejando fija la distancia entre fuente y destino).

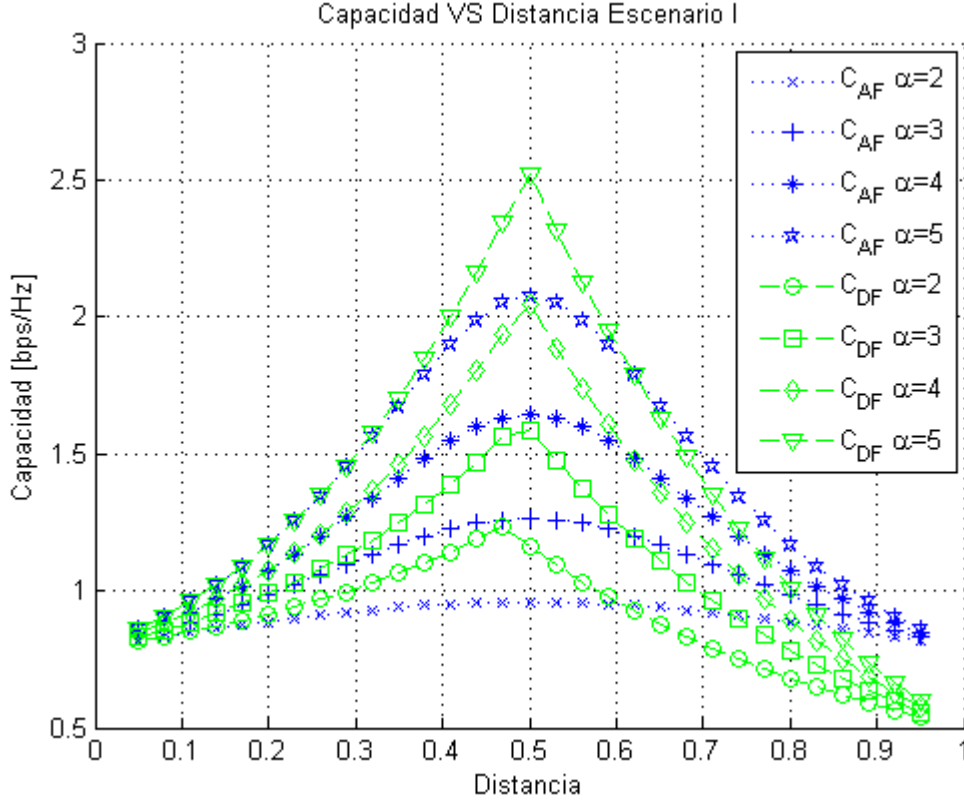


Figura 2.4: Capacidad VS Distancia Escenario I, sin desvanecimiento

Dado que el valor de la distancia es menor que la unidad, conforme aumenta el valor del exponente de pérdidas, la capacidad aumenta (ya que  $\text{SNR} = \frac{P}{(\sigma^2 * d^\alpha)}$ ). Así, para clarificar la Figura 2.4 se simulará en el siguiente apartado otra situación en la que la distancia a cubrir entre fuente y destino sea mayor que la unidad.

Se observa (Figura 2.4) cómo para un esquema AF el valor máximo de capacidad se obtiene siempre para  $d = 0,5$  (punto medio de separación entre fuente y destino). La capacidad disminuye de manera simétrica conforme el relay se aleja de dicho punto medio, debido al propio funcionamiento del relay, ya que la potencia de la fuente coincide con la del relay y según la distancia aumenta entre transmisor y relay, se ve disminuida entre relay y receptor.

En cuanto al modo DF, si el exponente aumenta se obtiene la máxima capacidad para  $d = 0,5$ , siendo  $d$  algo menor de 0,5 para coeficientes más pequeños. En este esquema no hay simetría, es decir, la velocidad con la que decrece la capacidad una vez alcanzado su valor máximo es mayor en el caso de situar el relay más cerca del destino que de la fuente. A continuación, se analiza dicho efecto con la ayuda de la expresión de la capacidad para un relay DF (Ec. 2.19) llamando C1 al término  $\log_2(1 + \text{SNR}_{SR})$  y C2 al término  $\log_2(1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD})$ .

Al desplazar el relay, si C1 aumenta C2 disminuye y viceversa. El máximo valor se obtiene cuando  $C1 = C2$ . Al normalizar a la unidad la distancia entre fuente y destino, el valor de  $\text{SNR}_{SD}$  será menor que el de  $\text{SNR}_{SR}$  y el de  $\text{SNR}_{RD}$ , de manera que si el relay está más cerca de:

La fuente  $\rightarrow \text{SNR}_{SR} > \text{SNR}_{RD} \rightarrow C_{DF} = \frac{1}{2} \cdot C1$

Del destino  $\rightarrow \text{SNR}_{SR} < \text{SNR}_{RD} \rightarrow C_{DF} = \frac{1}{2} \cdot C2$

Dado que C1 es distinto de C2 se pone de manifiesto la no simetría de los valores de capacidad para distancias de igual magnitud en torno al punto medio de separación.

Al analizar la Figura 2.4 parecería razonable elegir el modo AF cuando el relay se situara en posiciones tanto cercanas a la fuente (dado que la complejidad del relay resulta menor y los valores son similares a los del modo DF) como cercanas al destino (valores superiores al DF). Sin embargo, el modo DF resultaría más adecuado en posiciones intermedias dado que los valores de capacidad son mayores que los del modo AF.

### 2.3.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

A continuación, se muestra el valor de la capacidad con el relay en modo AF y con una distancia entre fuente y destino de valor 5 unidades. En la Figura 2.5 se observa cómo aparecen dos puntos máximos y uno mínimo de capacidad. Conforme se separa al relay de la distancia intermedia entre fuente y destino (valor mínimo de capacidad), la capacidad aumenta de manera simétrica hasta alcanzar los valores máximos, para disminuir posteriormente. El comportamiento simétrico es debido al propio funcionamiento del relay, ya que la potencia de la fuente coincide con la del relay y conforme la distancia aumenta entre fuente y relay, se ve disminuida entre relay y receptor (Ec. 2.10)<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup>En el Apéndice C se obtiene de manera analítica el valor de los máximos y mínimo de la capacidad.

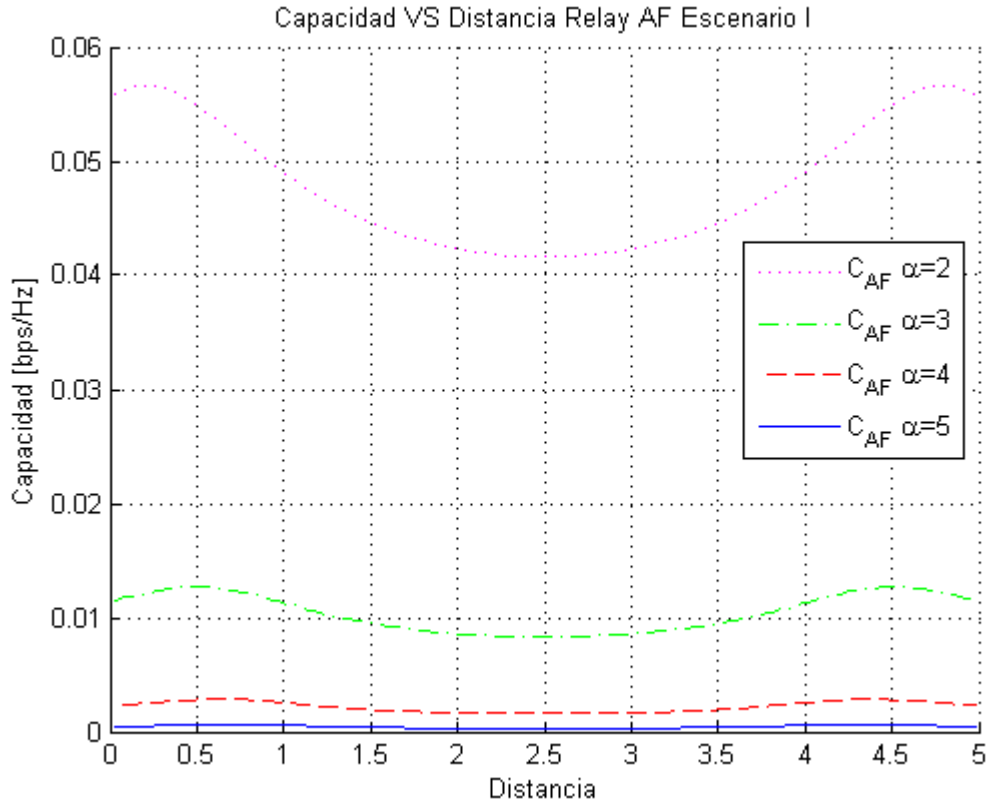


Figura 2.5: Capacidad VS Distancia Escenario I modo AF, sin desvanecimiento

Cabe destacar que el valor de la capacidad se maximiza en aquellas posiciones del relay realmente próximas tanto al transmisor como al receptor. Por otro lado, se verifica cómo al aumentar el valor del exponente  $\alpha$ , la capacidad disminuye y los valores de capacidad resultan más similares entre el mínimo y los máximos.

En el esquema DF el comportamiento (Figura 2.6) es similar al del escenario con distancia unitaria; verificándose la no simetría y que la máxima capacidad se alcanza en la distancia media (su explicación es análoga a la realizada en dicho caso). Se cumple que al aumentar las pérdidas la capacidad se hace menor.

Por otro lado, la Figura 2.7 pone en manifiesto el hecho de que no siempre una estrategia

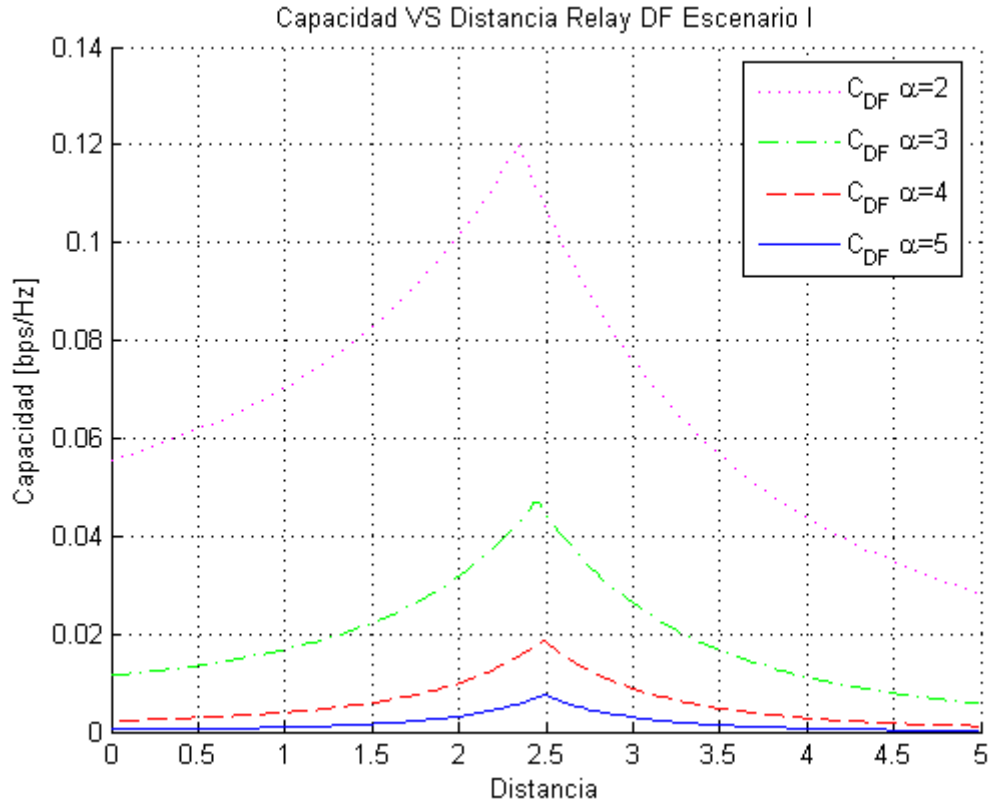


Figura 2.6: Capacidad VS Distancia Escenario I modo DF, sin desvanecimiento

cooperativa con relay ofrecerá mejores prestaciones que un enlace directo, lo que pone en manifiesto la importancia del estudio de los diversos parámetros de influencia como potencia, ruido, distancia... para poder ofrecer un valor de capacidad que llegue incluso a superar al de la transmisión directa.

Se puede apreciar que en el peor caso, para un exponente 2 de pérdidas, el modo AF no alcanza la capacidad del enlace directo para ninguna posición del relay. En cuanto al exponente 5, podría establecerse que los valores de capacidad AF que superan a la transmisión directa no resultan suficientes debido a su escasa magnitud.

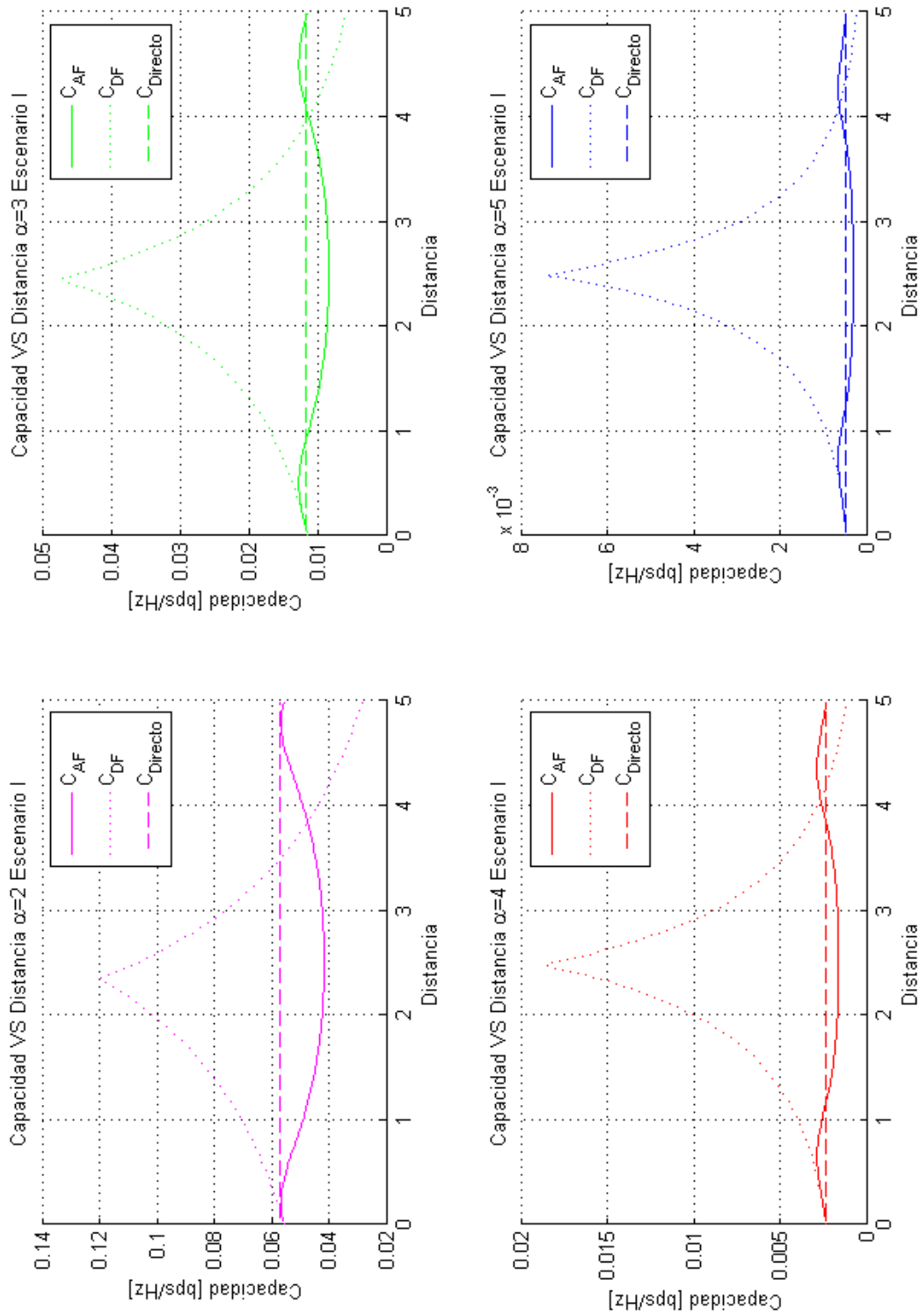


Figura 2.7: Capacidad VS Distancia Escenario I, exponente de pérdidas

Por último, se muestra (Figura 2.8) la comparativa entre el Escenario I y la transmisión sin relay para potencias de 1[W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro que se ha decidido tomar como referencia.

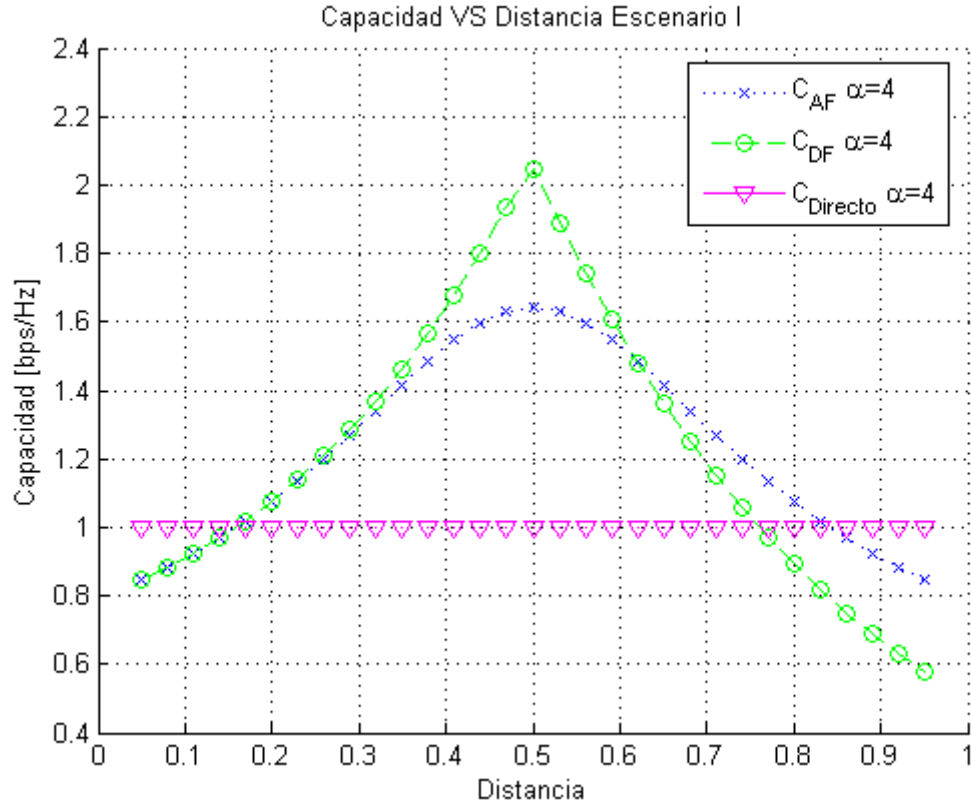


Figura 2.8: Capacidad VS Distancia Escenario I, sin desvanecimiento

Resulta importante destacar la importancia de una correcta elección en la ubicación del relay para poder obtener mejores prestaciones que en el caso de la transmisión directa. Hasta distancias menores de 0.4 (incluyendo un pequeño margen de separación) resulta indiferente elegir una estrategia AF o DF(aunque sería óptimo escoger AF debido a su baja complejidad); sin embargo, esto no ocurre para distancias mayores de 0.6, ya que interesaría elegir una estrategia AF. En distancias comprendidas entre 0.4 y 0.6 resultaría idóneo elegir el modo DF.

## 2.4. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

En sistemas de comunicaciones móviles es común que el receptor reciba varias señales procedentes de múltiples reflexiones en el trayecto desde el emisor. Se va a utilizar como modelo de pérdidas de desvanecimiento el modelo de Rayleigh en el que la señal al propagarse a través de un canal de comunicaciones varía de manera aleatoria, esto es, como una Gaussiana compleja. Este modelo resulta útil cuando no hay visión directa entre emisor y receptor (NLOS). De este modo, las pérdidas de cada canal se van a modelar con variables aleatorias Gaussianas complejas.<sup>6</sup>

### 2.4.1. Capacidad y potencia

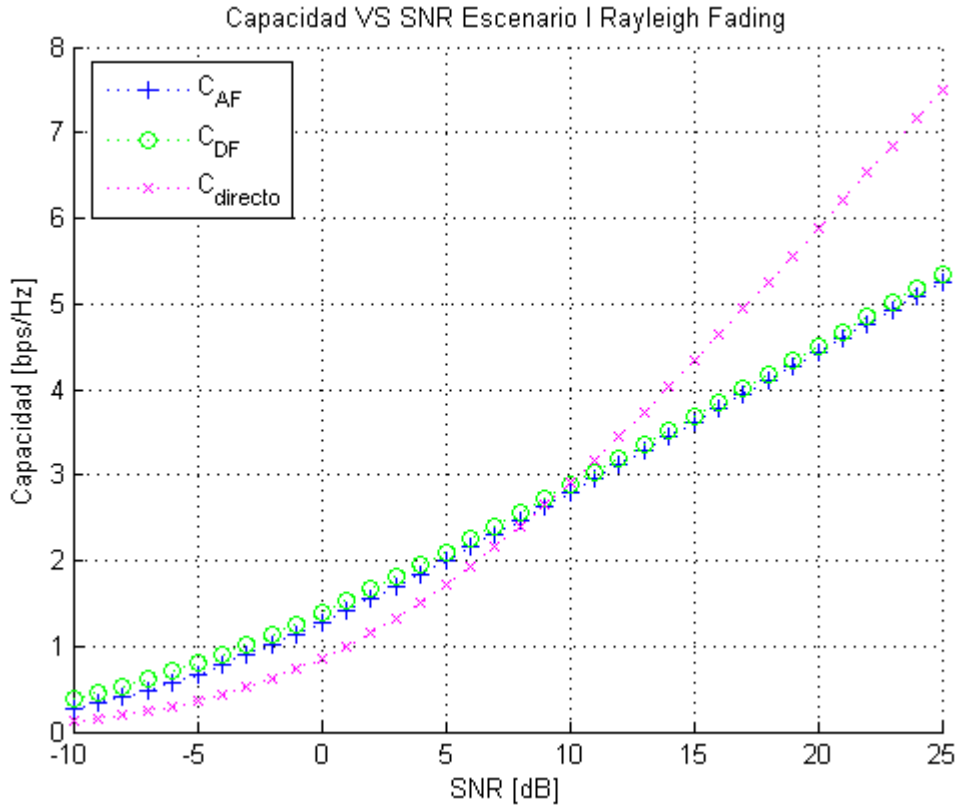


Figura 2.9: Capacidad VS Potencia Escenario I, con desvanecimiento

La Figura 2.9 muestra un comportamiento similar al caso sin desvanecimiento (se han utilizado los mismos valores que entonces), pero se destaca que la capacidad del modo DF es en torno a una décima superior a la del modo AF, y los valores de capacidad resultan ligeramente

<sup>6</sup>Por ejemplo, para el canal entre fuente y destino  $h_{SD} = \sqrt{\frac{1}{d_0^{\alpha}}} \cdot \frac{\text{randn}(1,t) + j \cdot \text{randn}(1,t)}{\sqrt{2}}$



inferiores con respecto al caso sin desvanecimiento. En este caso la capacidad ofrecida por el relay en modo DF difiere muy poco de la proporcionada por el modo AF. Se pueden distinguir 2 regiones:

$$\text{SNR} < 9\text{dB} \rightarrow C_{DF} > C_{AF} > C_{directo}$$

$$\text{SNR} > 9\text{dB} \rightarrow C_{directo} > C_{DF} > C_{AF}$$

### 2.4.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

Se van a simular los mismos valores que en el caso sin desvanecimiento, normalizando a la unidad la distancia entre fuente y destino.

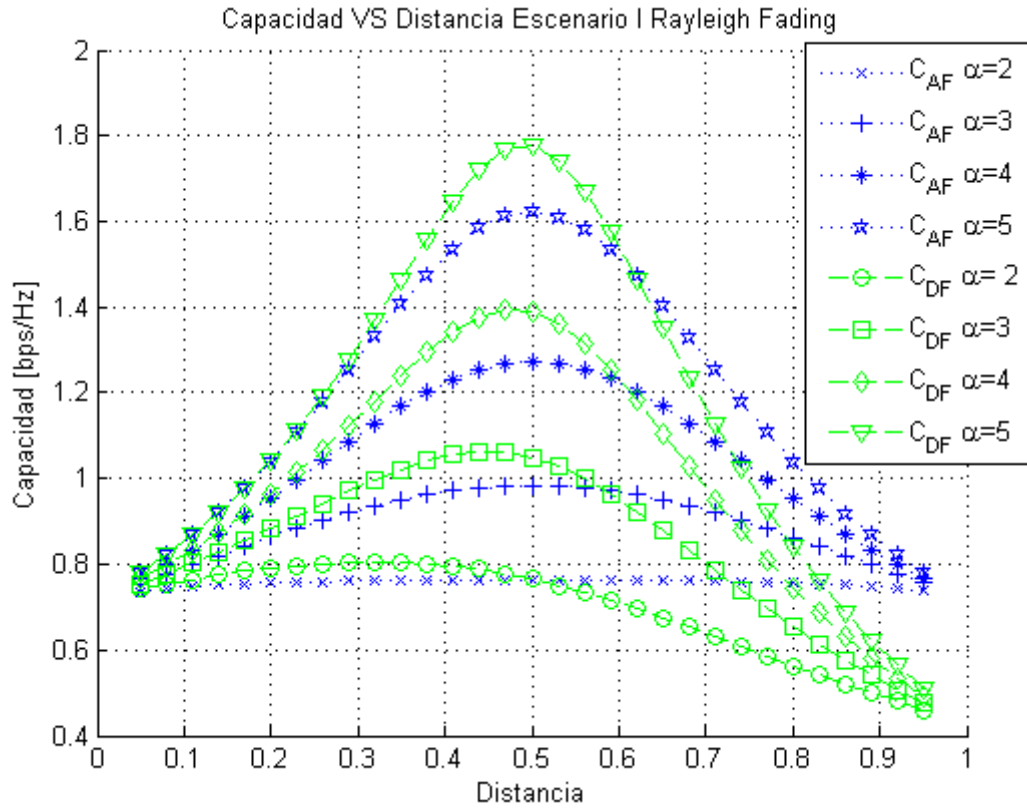


Figura 2.10: Capacidad VS Distancia Escenario I, con desvanecimiento

Se produce una repuesta análoga a la del caso citado, aunque disminuyen ligeramente los valores de la capacidad. Por ejemplo, para  $\alpha = 2$ , si  $d < 0,43$  resulta ligeramente mejor el modo DF y si  $d > 0,43$  el modo AF ofrece sensiblemente mayor capacidad.

### 2.4.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

A continuación se muestran los resultados para los modos AF y DF en el caso de simular una distancia mayor que la unidad entre fuente y destino al incluir desvanecimiento.

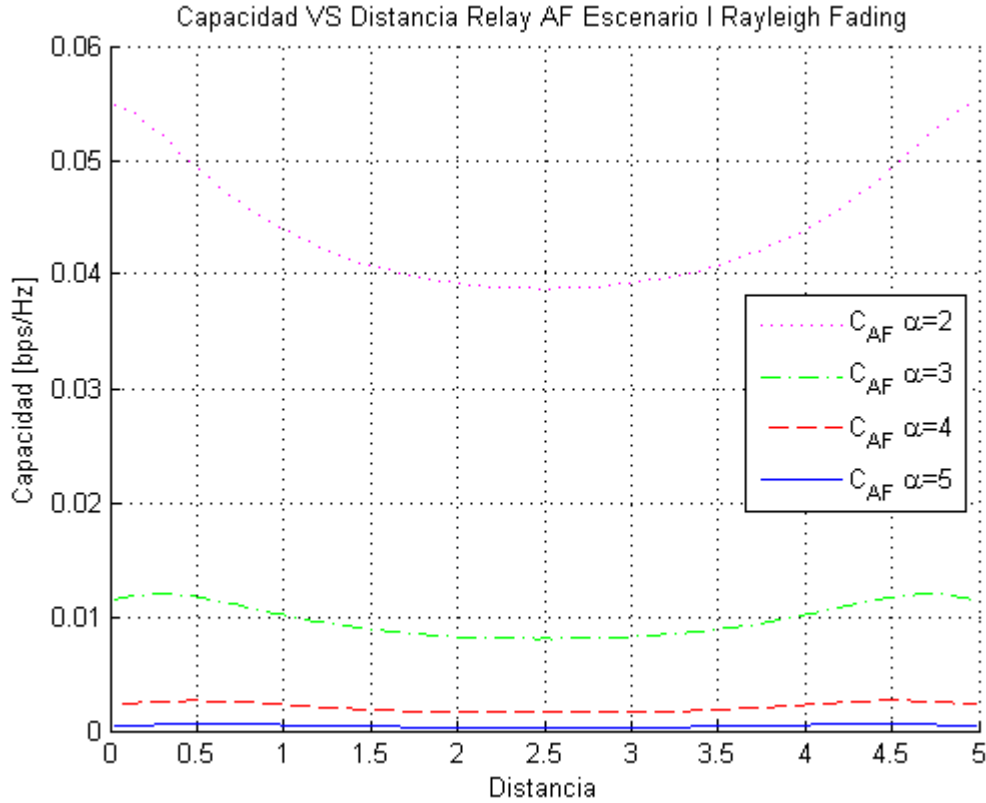


Figura 2.11: Capacidad VS Distancia Escenario I modo AF, con desvanecimiento

En el modo AF, Figura 2.11, siguen produciéndose los máximos y el mínimo en las posiciones correspondientes (como ocurría en el caso sin desvanecimiento), los valores de la capacidad resultan similares a los de entonces.

En el modo DF, Figura 2.12, las diferencias son más notables, las curvas ya no son tan picudas sino que se suavizan y los valores de la capacidad disminuyen en mayor medida que en modo AF cuando se compara con el caso sin desvanecimiento.

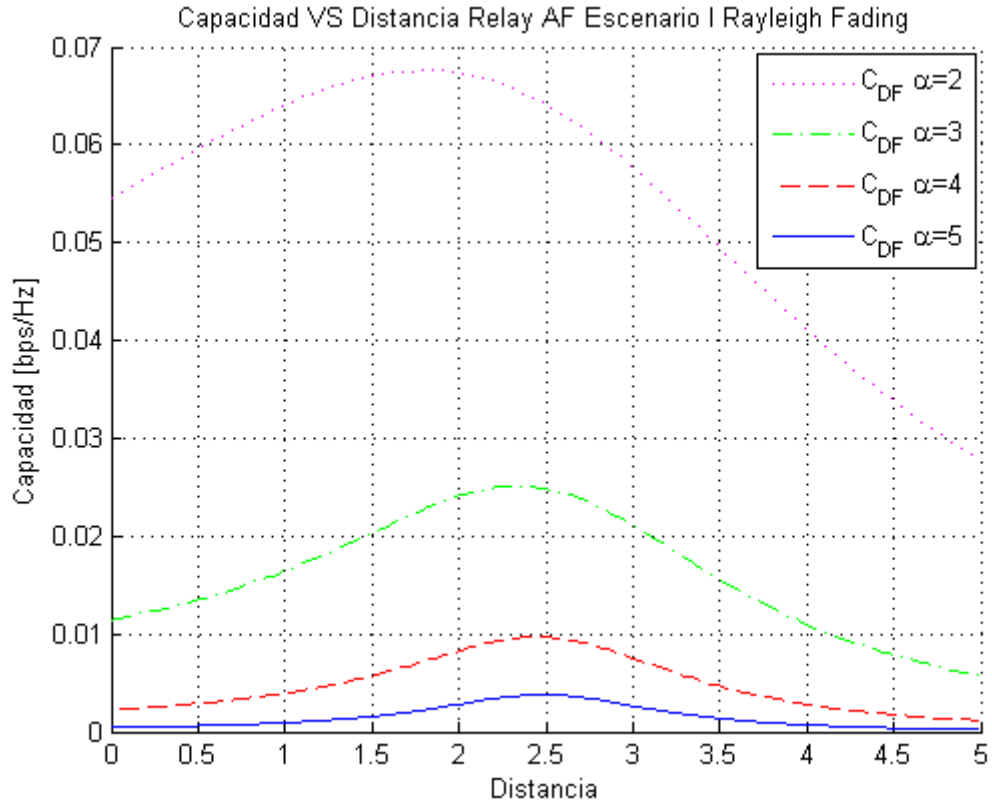


Figura 2.12: Capacidad VS Distancia Escenario I modo DF, con desvanecimiento

La Figura 2.13 detalla la influencia del exponente de pérdidas.

Para  $\alpha = 4$ , a pesar de que el valor de la capacidad se vea reducido, el relay en modo AF ofrece mayor capacidad que el enlace directo para un 40 % del margen de posiciones posibles y el relay en modo DF ofrece un comportamiento más simétrico en función de la distancia.

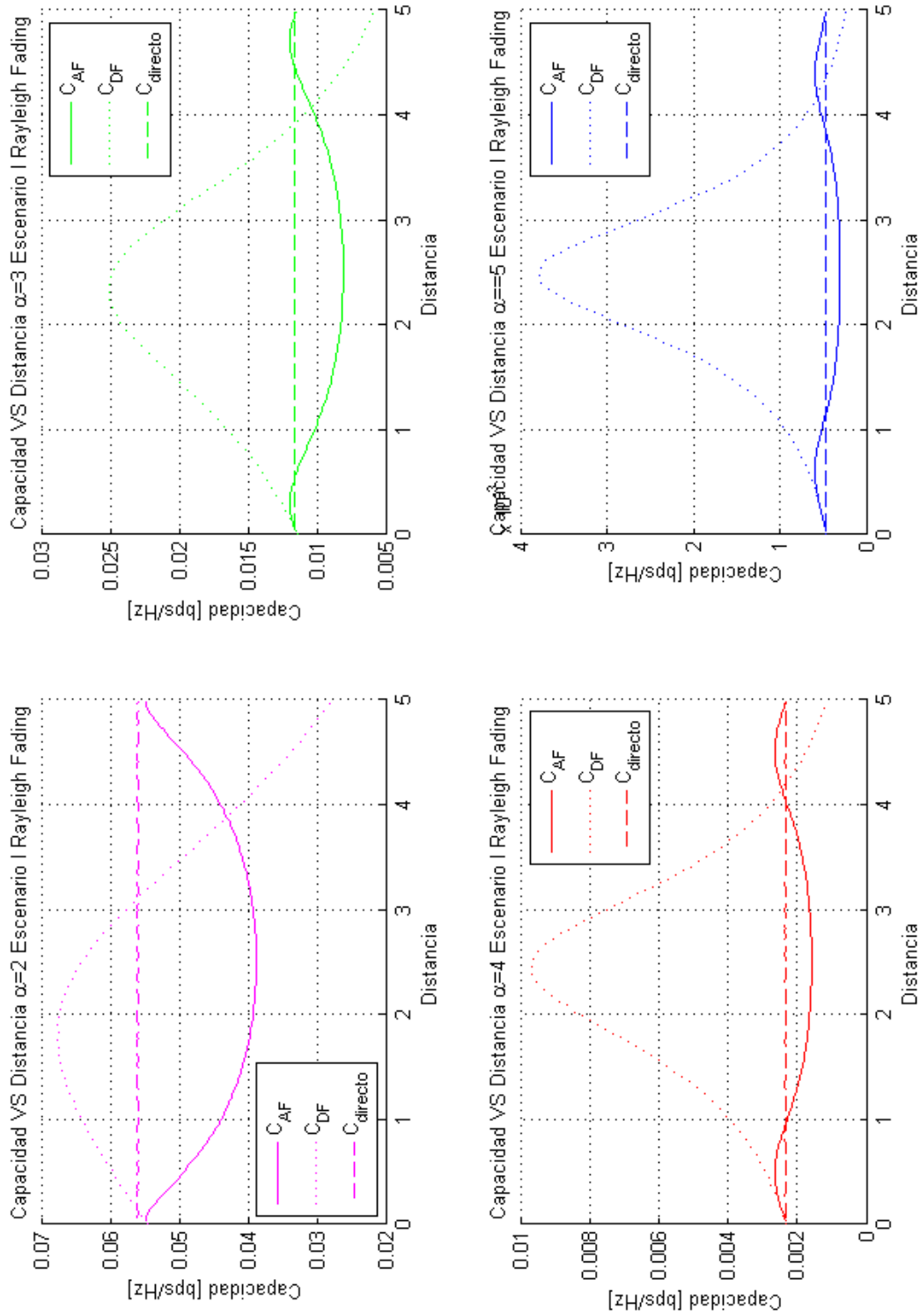


Figura 2.13: Capacidad VS Distancia Escenario I, exponente de pérdidas, desvanecimiento

Por último, se muestra (Figura 2.14) la comparativa entre el Escenario I y la transmisión sin relay para  $\alpha = 4$ . Se obtienen resultados similares a los del caso sin desvanecimiento.

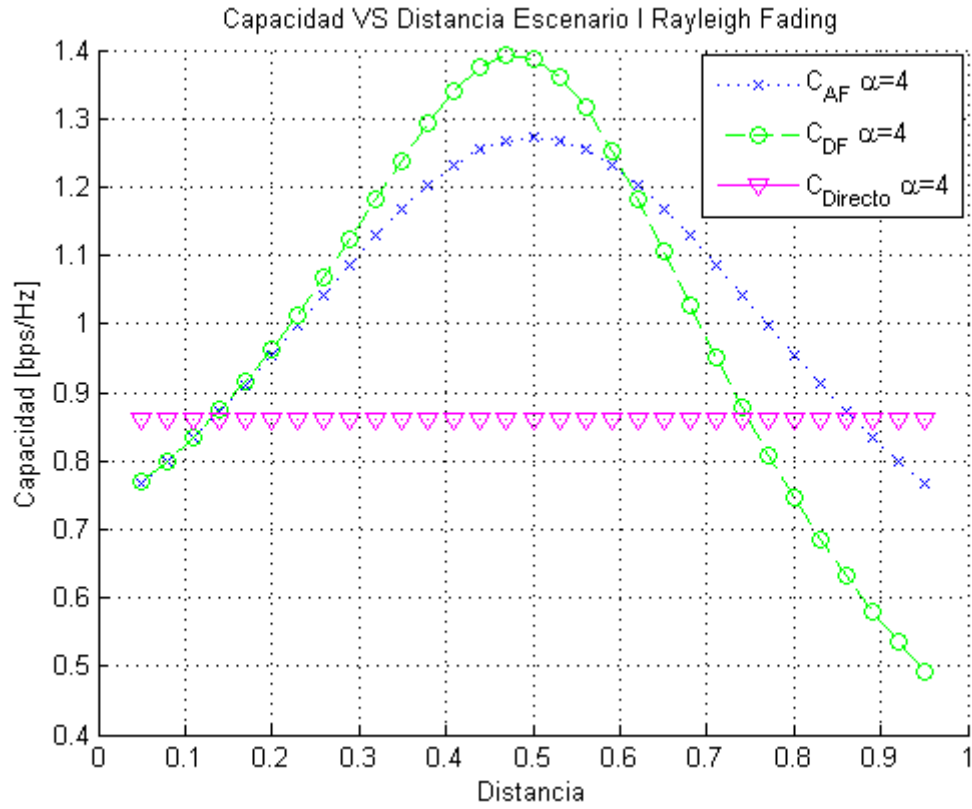


Figura 2.14: Capacidad VS Distancia Escenario I, con desvanecimiento



## ESCENARIO II

### 3.1. AF

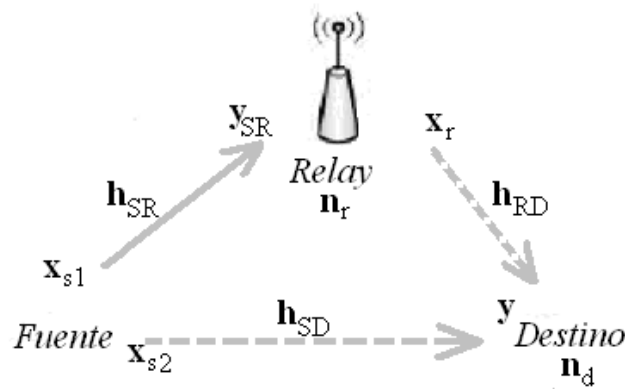


Figura 3.1: Escenario II

La fuente divide el mensaje  $m$  en dos submensajes de igual longitud (se supone que la duración de los dos TS es la misma)  $m_1$  y  $m_2$ ; a continuación los codifica de manera independiente en dos palabras código  $X_{s1}$  y  $X_{s2}$ . En el primer TS  $X_{s1}$  es modulada en  $x_{s1}$  y enviada de hacia el relay, la señal recibida es  $y_{SR}$ . A su vez, el relay procesa  $y_{SR}$  y obtiene una palabra código  $X_r$  que es modulada siguiendo un esquema BPSK [14], convirtiéndose en  $x_r$ . Así mismo, el relay transmite dicha señal en el segundo TS hacia el destino. Mientras tanto, la fuente modula  $X_{s2}$  en  $x_{s2}$  y la envía de hacia el destino. Al igual que en el Escenario I, los términos  $h_{ij}$  representan las pérdidas de canal y los términos de ruido  $n_i$  se modelan como una Gaussiana de media nula y varianza  $\sigma_i^2$ .

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR} = h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r \quad (3.1)$$

La señal recibida en el destino,  $y$ , resulta:

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y = h_{RD} \cdot x_r + h_{SD} \cdot x_{s2} + n_d \quad (3.2)$$

El relay, al seguir una estrategia AF, amplifica la señal recibida por la fuente (tal y como ocurría en el primer escenario):

$$x_r = f \cdot y_{SR} \quad (3.3)$$

Siendo  $f$  el factor de escalado obtenido a partir de las restricciones iniciales impuestas<sup>1</sup>:

$$f = \sqrt{\frac{P_r}{|h_{SR}|^2 \cdot P_s + \sigma_r^2}} \quad (3.4)$$

Tras sustituir el factor de escalado en Ec. 3.2, la señal recibida en el destino,  $y$ , durante el segundo TS queda:

$$y_{RD} = h_{RD} \cdot f \cdot (h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r) + h_{SD} \cdot x_{s2} + n_d \quad (3.5)$$

Se pueden resumir las ecuaciones anteriores en modo matricial:

$$\bar{y} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \bar{n} \quad (3.6)$$

$$y = \begin{pmatrix} h_{SR} \cdot f \cdot h_{RD} & h_{SD} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f \cdot h_{RD} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_r \\ n_d \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Al igual que para el Escenario I, se utiliza la siguiente fórmula para calcular la capacidad:

$$C = \log_2 \left| \bar{I} + \left( \bar{B} \cdot \bar{R}_n \cdot \bar{B}^H \right)^{-1} \cdot P_s \cdot \bar{A} \cdot \bar{A}^H \right| \quad (3.8)$$

---

<sup>1</sup>

$$E \{ |x_{si}|^2 \} \leq P_s \quad i = 1, 2 \quad E \{ |x_r|^2 \} \leq P_r$$



Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF2} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{\text{SNR}_{SR} \cdot \text{SNR}_{RD} + \text{SNR}_{SR} \cdot \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{SD}}{1 + \text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{RD}} \right] \quad (3.9)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_d^2} \quad \text{SNR}_{SR} = \frac{P_s \cdot |h_{SR}|^2}{\sigma_r^2} \quad \text{SNR}_{RD} = \frac{P_r \cdot |h_{RD}|^2}{\sigma_d^2}$$

### 3.2. DF

A continuación se plantea el sistema de ecuaciones que rige la comunicación entre nodos para el modo de funcionamiento DF (ver Figura 3.1).

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR} = h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r \quad (3.10)$$

$$(3.11)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y = h_{SD} \cdot x_{s2} + h_{RD} \cdot x_r + n_d \quad (3.12)$$

Al utilizar RC, se cumple que:  $x_r = \beta \cdot x_{s1}$ , siendo  $\beta = \sqrt{\frac{P_r}{P_s}}$ . Por tanto, empleando la Ec. 3.6 resulta:

$$y = \begin{pmatrix} h_{SD} & \beta \cdot h_{RD} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{s2} \\ x_{s1} \end{pmatrix} + n_d \quad (3.13)$$

Este escenario se diferencia del Escenario I en que la comunicación entre la fuente y el destino se realiza en el segundo TS. En el cálculo de la capacidad ofrecida por el relay en modo DF para el Escenario I se analizó que únicamente se tiene en cuenta el intercambio de información de la fuente y el relay con el destino, y por otro lado, de la fuente con el relay (Ec. 2.18) sin diferenciar los instantes temporales; por ello este escenario ofrece la misma capacidad en modo DF. Esto es,

$$C_{DF2} = \frac{1}{2} \min \{ \log_2 (1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}), \log_2 (1 + \text{SNR}_{SR}) \} \quad (3.14)$$

### 3.3. Resultados numéricos entorno sin desvanecimiento

#### 3.3.1. Capacidad y potencia

Tal y como se realizó en el Escenario I, inicialmente se va evaluar el valor de capacidad según se transmite un determinado nivel de potencia, para una distancia fija de 0.5 unidades entre los nodos, siendo las pérdidas en el trayecto:  $h_{ij} = \sqrt{\frac{1}{0,5^4}}$  y las varianzas de ruido serán iguales a la unidad. La Figura 3.2 muestra los resultados obtenidos.

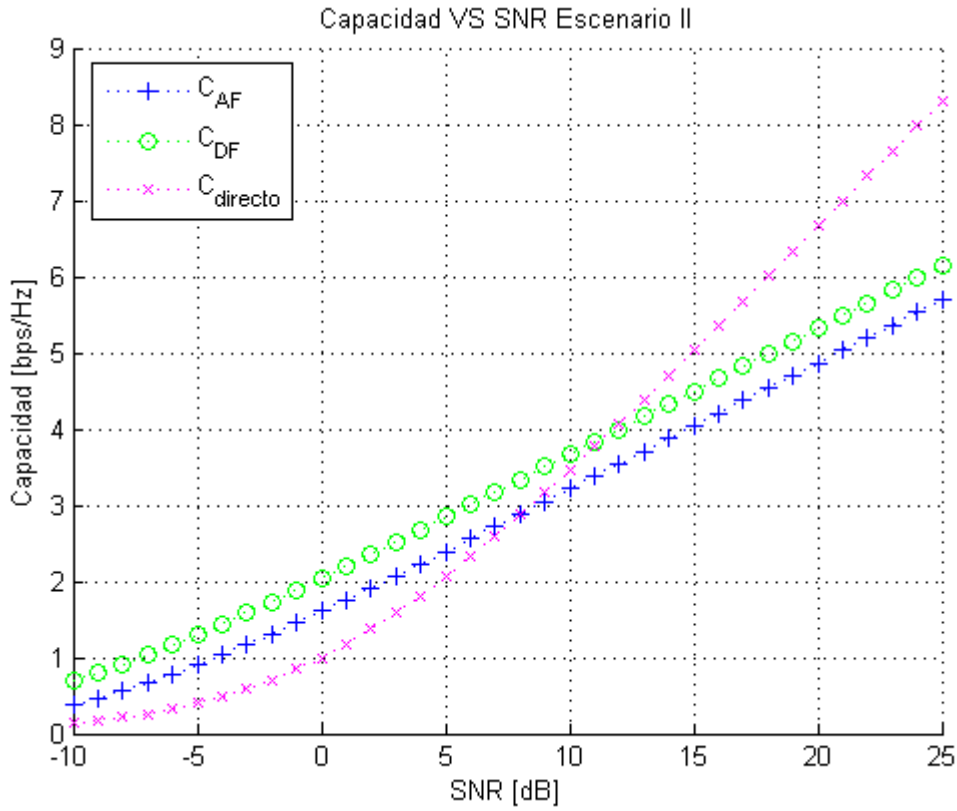


Figura 3.2: Capacidad VS SNR Escenario II, sin desvanecimiento

De la misma manera, al aumentar el nivel de potencia, la capacidad del sistema aumenta experimentando el mismo comportamiento en los modos AF y DF que los seguidos en el Escenario I. Se pueden distinguir las siguientes regiones:

$$\begin{aligned}
 \text{SNR} < 8,3\text{dB} &\rightarrow C_{DF} > C_{AF} > C_{directo} \\
 8,3\text{dB} < \text{SNR} < 11,5\text{dB} &\rightarrow C_{DF} > C_{directo} > C_{AF} \\
 \text{SNR} > 11,5\text{dB} &\rightarrow C_{directo} > C_{DF} > C_{AF}
 \end{aligned}$$

Se observa que la capacidad obtenida con un esquema DF también resulta mayor que con uno AF.

### 3.3.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

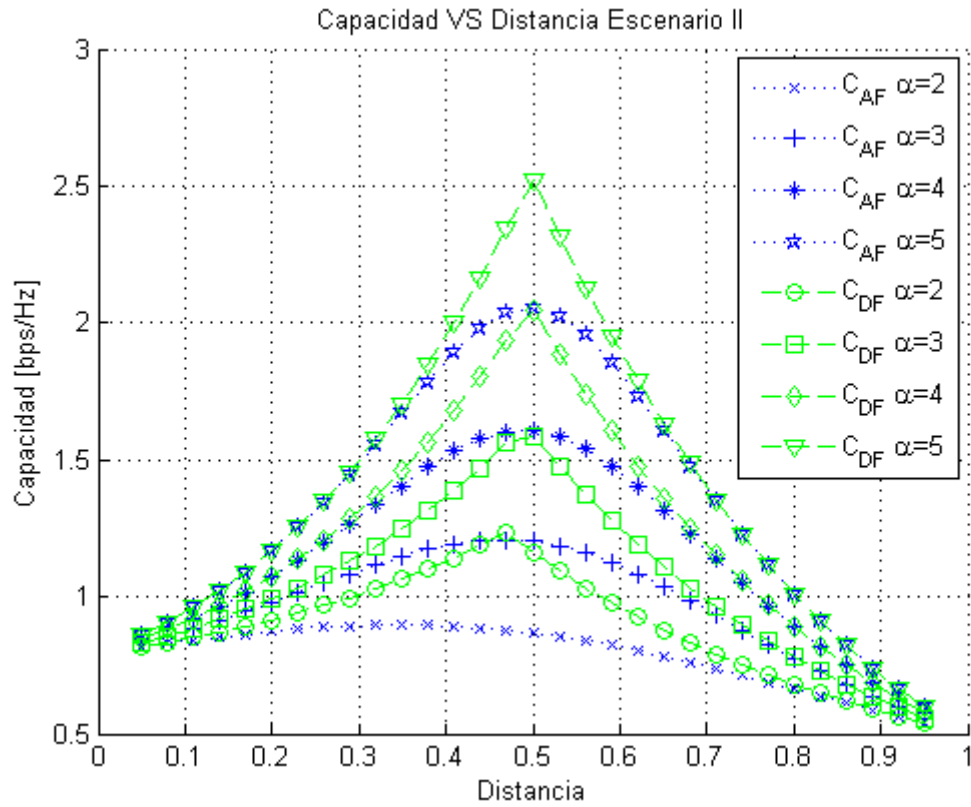


Figura 3.3: Capacidad VS Distancia Escenario II, sin desvanecimiento

En esta situación en la que el valor de la distancia es menor que la unidad, la capacidad aumenta al aumentar el valor del exponente de pérdidas. La Figura 3.4 y la Figura 2.6 mostrarán el caso en el que la distancia a cubrir sea mayor que la unidad.

Se observa (Figura 3.3) que para el modo AF el valor máximo de capacidad se obtiene siempre para  $d = 0,5$  (punto medio de separación entre fuente y destino), al igual que en el Escenario I. Sin embargo, la capacidad no disminuye de manera simétrica conforme el relay se aleja de dicho punto medio, sino que decrece en mayor valor en las zonas más cercanas al destino. Esto es

consecuencia de que el término  $\text{SNR}_{SR}$  posee una mayor influencia sobre el valor de la capacidad que el término  $\text{SNR}_{RD}$  tal y como se aprecia en la Ec. 3.9 (aparece dos veces en el numerador).

En cuanto al modo DF, experimenta el mismo comportamiento que en el Escenario I tal y como se justificó en el apartado teórico.

### 3.3.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

En este caso tampoco se va a mostrar la gráfica del valor de la capacidad en función de la distancia para el modo de funcionamiento DF ya que resulta idéntica a la del Escenario I, es decir, la Figura 2.6.

Para el modo de funcionamiento AF, la Figura 3.4 muestra la evolución de la capacidad en función de la ubicación del relay, para una distancia de 5 unidades entre fuente y destino. Se verifica que el valor es superior en las zonas próximas a la fuente tal y como se acaba de explicar en el apartado anterior.

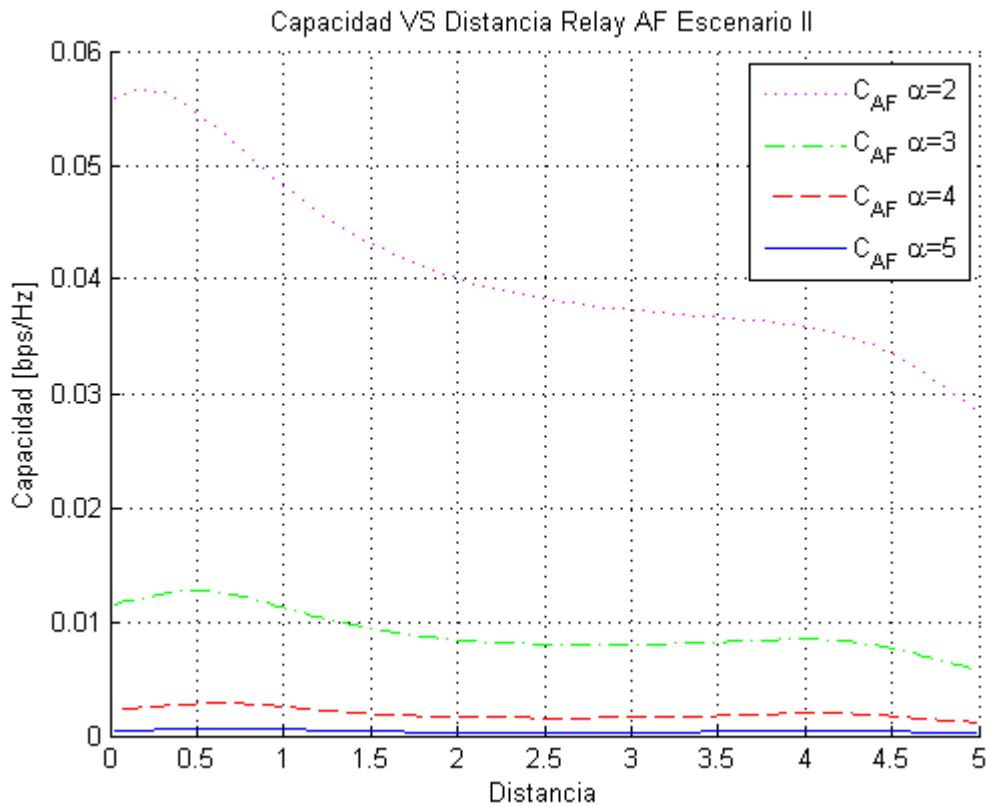


Figura 3.4: Capacidad VS Distancia Escenario II modo AF, sin desvanecimiento

Para este modo de funcionamiento parece razonable escoger aquellas posiciones comprendidas entre la fuente y la distancia intermedia entre fuente y destino, dado que según se aleje el relay de la fuente, el valor de la capacidad disminuye.

Por otro lado, la Figura 3.5 resume los valores de capacidad alcanzables en función del valor del exponente de pérdidas y de la posición del relay. Es importante destacar que para el exponente de valor 4, el modo AF sólo consigue superar el valor de capacidad ofrecido en un escenario sin relays en un entorno cercano al transmisor, aproximadamente en un 20 % de las posibles ubicaciones. Siendo el valor máximo alcanzable un 9 % del obtenido en el Escenario de transmisión directa. En cuanto al modo DF, se mejora la capacidad en un 80 % de las ubicaciones, pudiendo cuadruplicar el valor de la capacidad.

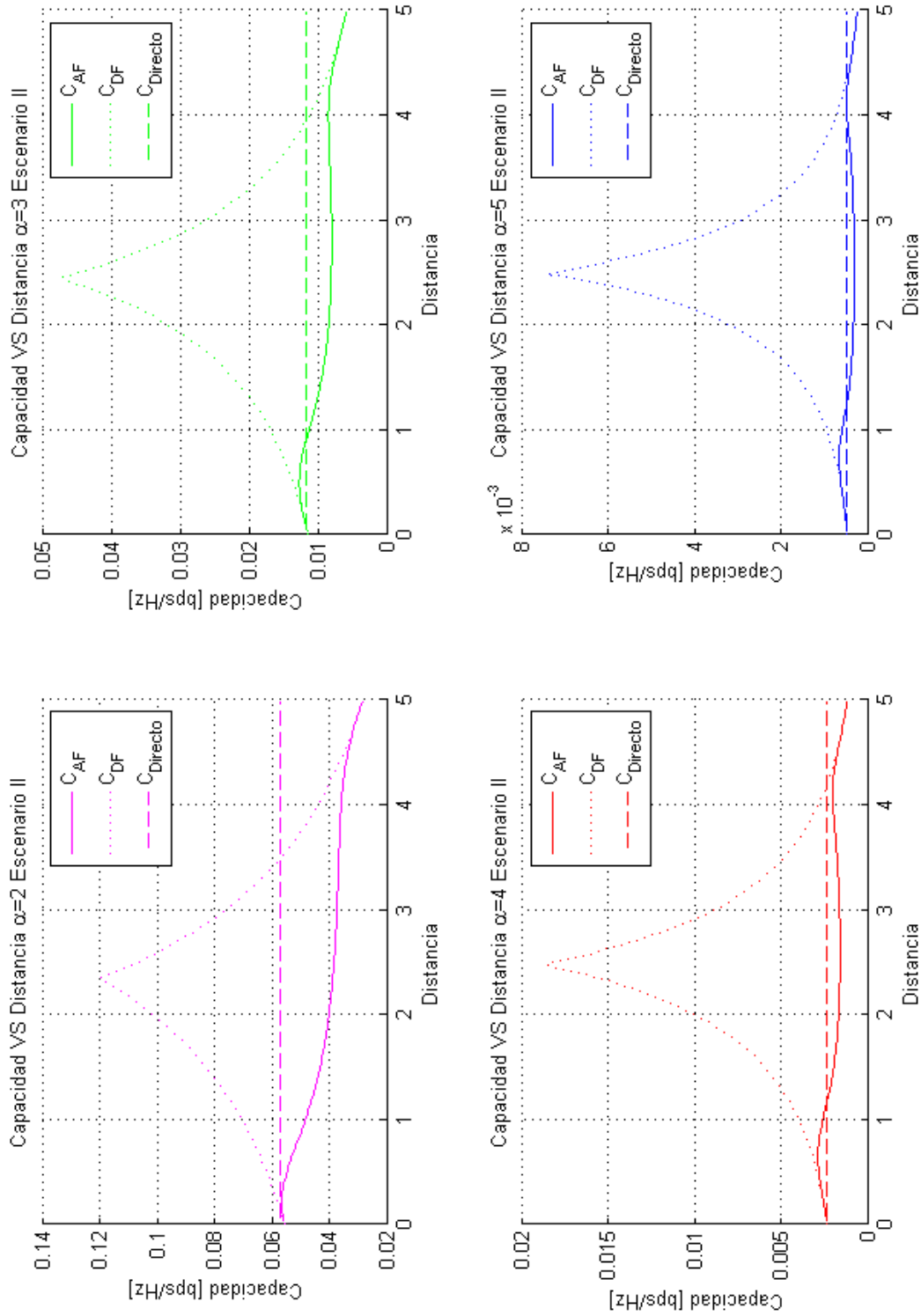


Figura 3.5: Capacidad VS Distancia Escenario II, exponente de pérdidas

Por último, se muestra (Figura 3.6) la comparativa entre el Escenario II y la transmisión sin relay para potencias de 1[W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

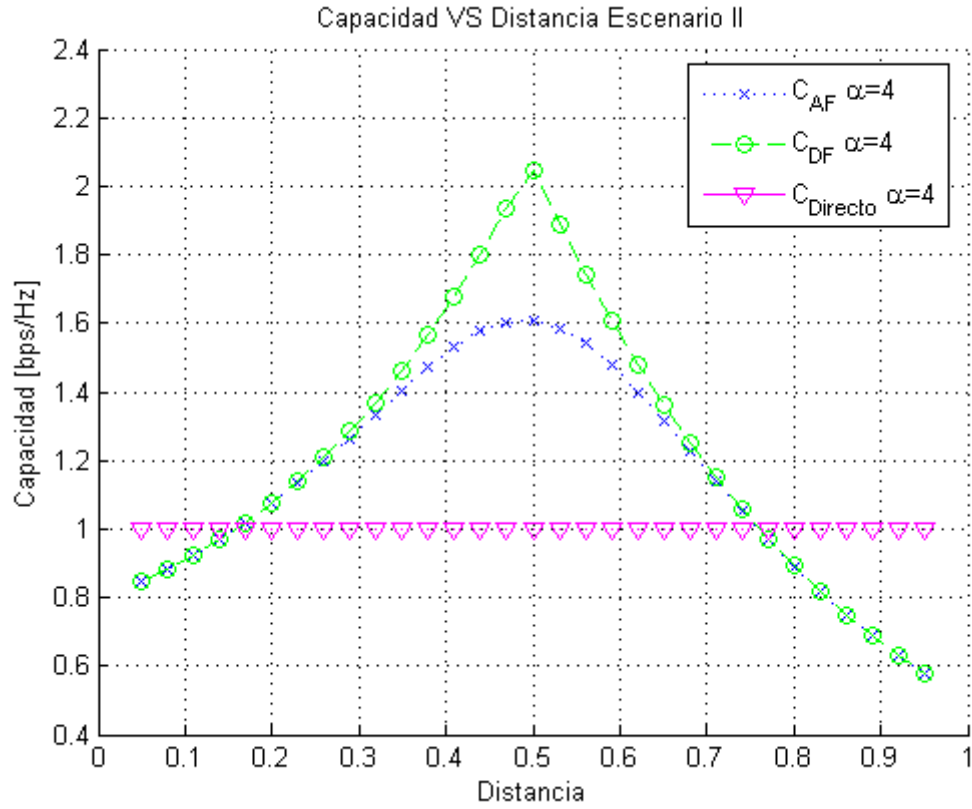


Figura 3.6: Capacidad VS Distancia Escenario II, sin desvanecimiento

### 3.4. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

#### 3.4.1. Capacidad y potencia

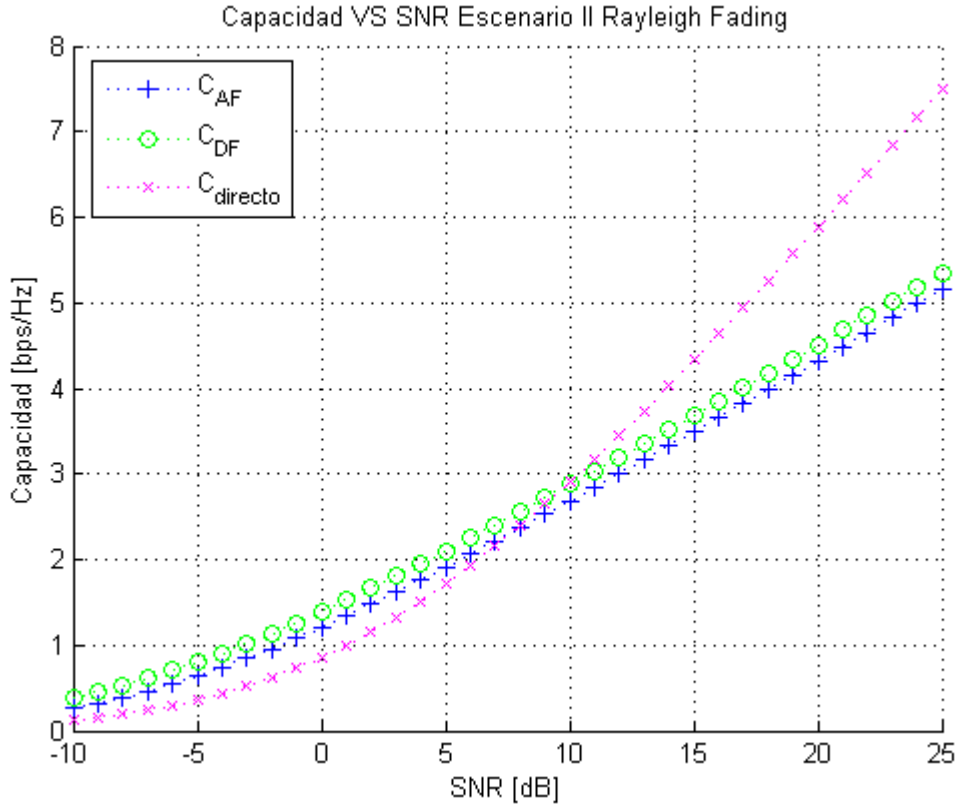


Figura 3.7: Capacidad VS SNR Escenario II, con desvanecimiento

En la Figura 3.11 se aprecia cómo el desvanecimiento de tipo Rayleigh hace disminuir los valores de capacidad, afectando en mayor medida al modo de funcionamiento AF con respecto al caso sin desvanecimiento. En este caso las regiones aparecen delimitadas por los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 \text{SNR} < 8\text{dB} &\rightarrow C_{DF} > C_{AF} > C_{directo} \\
 8\text{dB} < \text{SNR} < 10\text{dB} &\rightarrow C_{DF} > C_{directo} > C_{AF} \\
 \text{SNR} > 10\text{dB} &\rightarrow C_{directo} > C_{DF} > C_{AF}
 \end{aligned}$$



### 3.4.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

Tal y como se realizó en el caso ideal, normalizando a la unidad la distancia entre fuente y destino, se obtiene la siguiente figura:

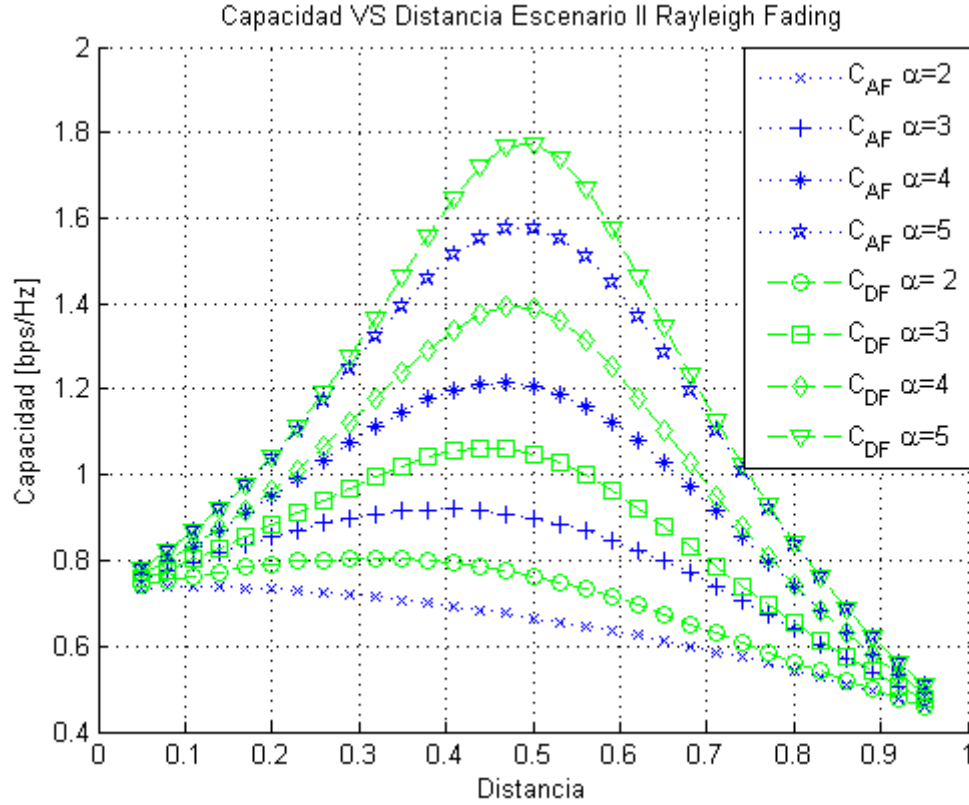


Figura 3.8: Capacidad VS Distancia Escenario II, con desvanecimiento

### 3.4.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

Para el modo DF no se muestra la gráfica de la capacidad en función de la distancia en entorno con desvanecimiento ya que es idéntica a la Figura 2.12 del Escenario I.

Para el modo de funcionamiento AF, la simulación resultante queda reflejada en la Figura 3.9.

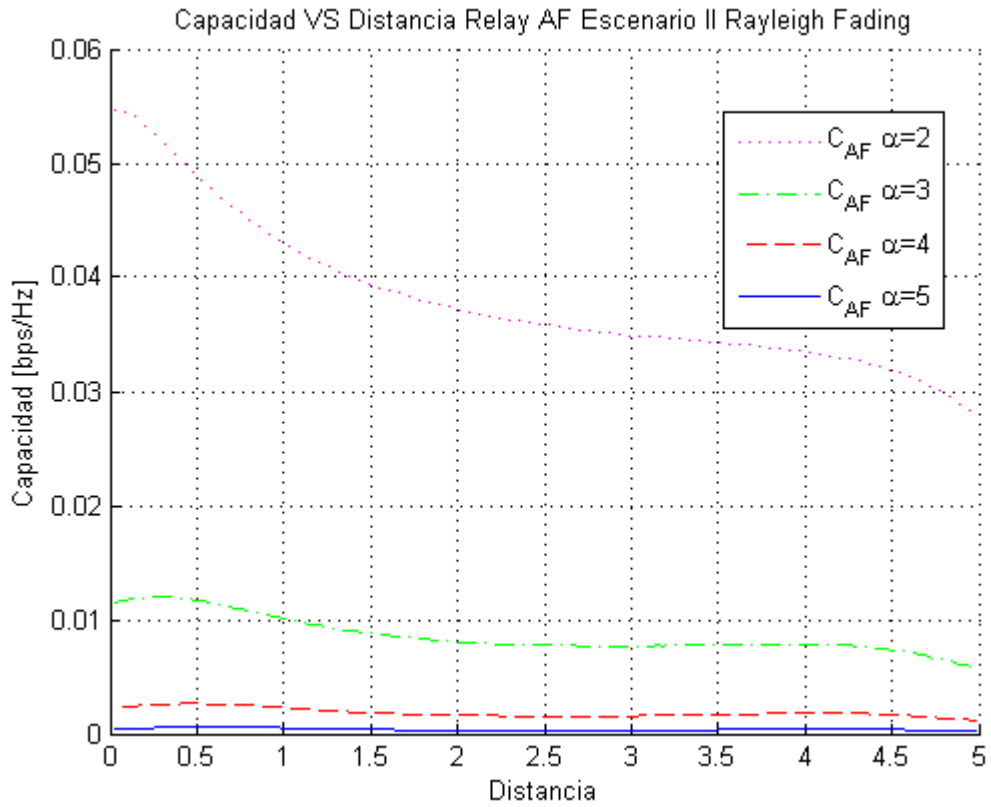


Figura 3.9: Capacidad VS Distancia Escenario II modo AF, con desvanecimiento

La Figura 3.10 muestra los valores de capacidad teniendo en cuenta: el modo de funcionamiento, la distancia y el valor del exponente de pérdidas en un entorno con desvanecimiento.

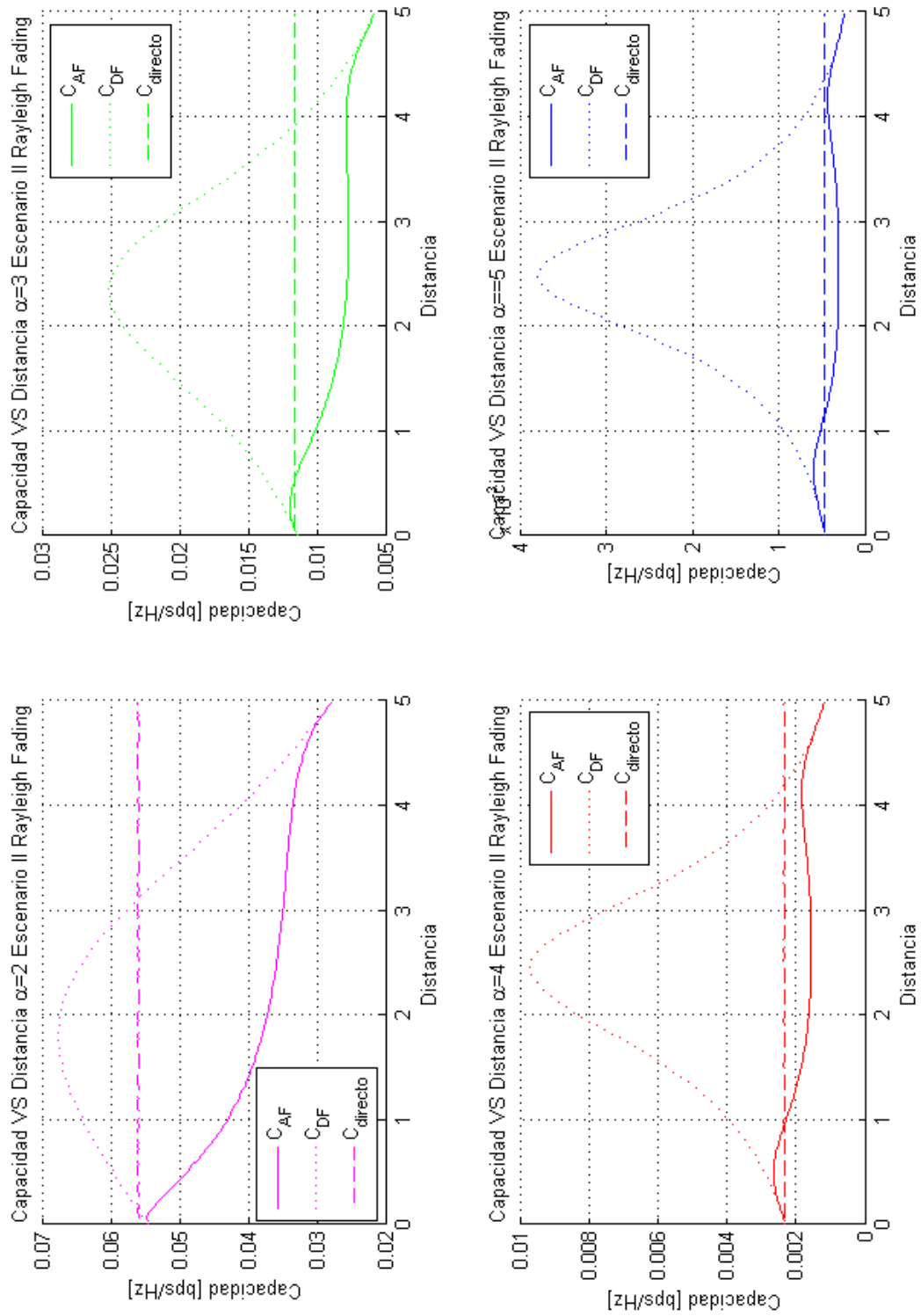


Figura 3.10: Capacidad VS Distancia Escenario II, exponente de pérdidas, desvanecimiento

En último lugar, la Figura 3.11 la enseña la comparativa entre el Escenario II y la transmisión sin relay para el entorno con desvanecimiento, con exponente de pérdidas de valor 4, con varianzas de ruido unitarias y potencias transmitidas de 1[W].

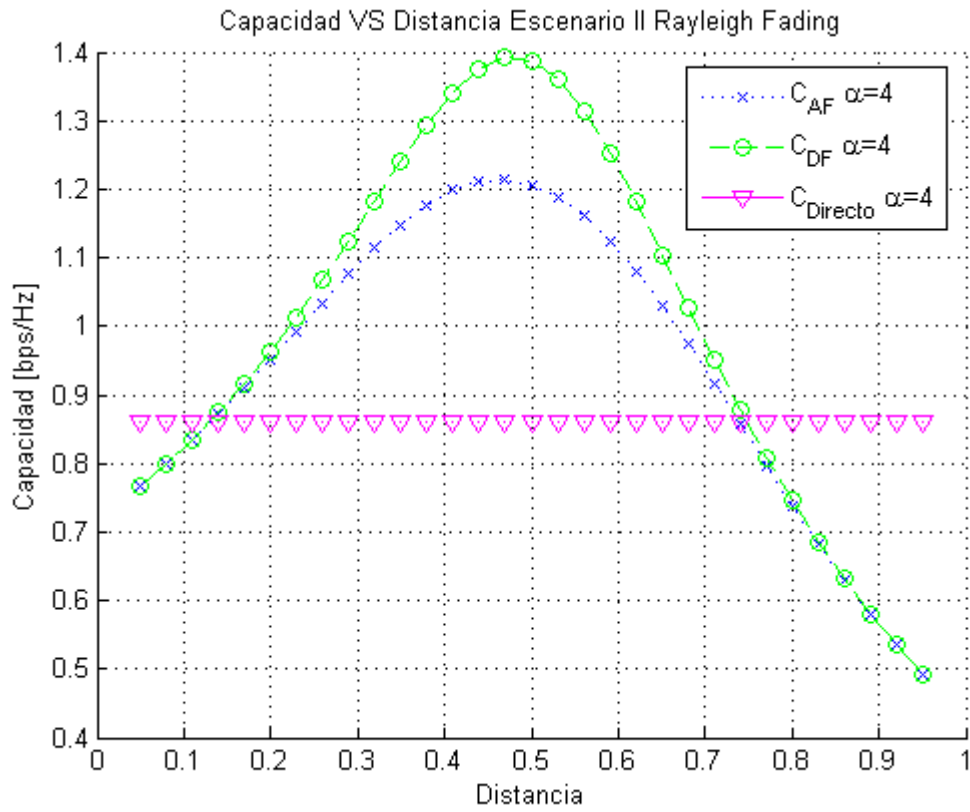


Figura 3.11: Capacidad VS Distancia Escenario II, con desvanecimiento

## ESCENARIO III

### 4.1. AF

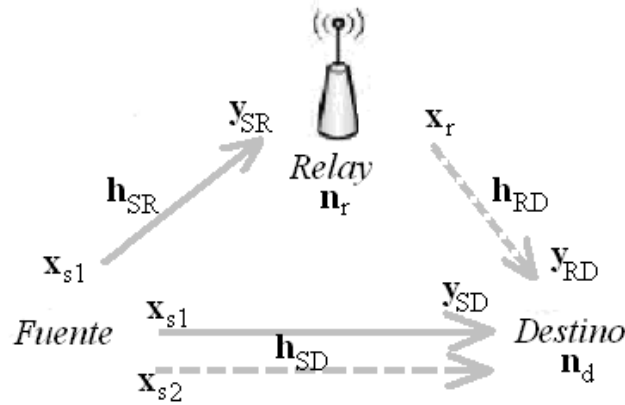


Figura 4.1: Escenario III

Este escenario puede verse como la combinación de los dos escenarios anteriores. La fuente divide el mensaje  $m$  en dos submensajes de igual longitud (se supone que la duración de los dos TS es la misma)  $m_1$  y  $m_2$ ; a continuación los codifica de manera independiente en dos palabras código  $X_{s1}$  y  $X_{s2}$ . En el primer TS  $X_{s1}$  es modulada en  $x_{s1}$  y enviada de hacia el relay y hacia el destino, las señales recibidas son  $y_{SR}$  e  $y_{SD}$ . A su vez, el relay procesa  $y_{SR}$  y obtiene una palabra código  $X_r$  que es modulada siguiendo un esquema BPSK [14], convirtiéndose en  $x_r$ . Así mismo, el relay transmite dicha señal en el segundo TS hacia el destino. Mientras tanto, la fuente modula  $X_{s2}$  en  $x_{s2}$  y la envía de hacia el destino.

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR} = h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r \quad (4.1)$$

$$y_{SD} = h_{SD} \cdot x_{s1} + n_{d1} \quad (4.2)$$

En el segundo TS se recibe señal proveniente del relay y de la fuente:

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y = y_{RD} + y_{SD} = h_{RD} \cdot x_r + h_{SD} \cdot x_{s2} + n_{d2} \quad (4.3)$$

El relay, al seguir una estrategia AF, amplifica la señal recibida por la fuente:

$$x_r = f \cdot y_{SR} \quad (4.4)$$

Siendo  $f$  el factor de escalado obtenido a partir de las restricciones iniciales impuestas<sup>1</sup>:

$$P_r = f^2 \left( |h_{SR}|^2 \cdot P_s + \sigma_r^2 \right) \Rightarrow f = \sqrt{\frac{P_r}{|h_{SR}|^2 \cdot P_s + \sigma_r^2}} \quad (4.5)$$

Tras sustituir el factor de escalado en la Ec. 4.13, la señal recibida en el destino, y, durante el segundo TS queda:

$$y = h_{RD} \cdot f \cdot (h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r) + h_{SD} \cdot x_{s2} + n_{d2} \quad (4.6)$$

Resumiendo las ecuaciones anteriores en modo matricial:

$$\bar{y} = \bar{\bar{A}} \cdot \bar{x} + \bar{\bar{B}} \cdot \bar{n} \quad (4.7)$$

$$\begin{pmatrix} y_{SD} \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{SD} & 0 \\ h_{SR} \cdot f \cdot h_{RD} & h_{SD} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ f \cdot h_{RD} & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_r \\ n_{d1} \\ n_{d2} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Al igual que en los escenarios anteriores, se utiliza la siguiente expresión [11]:

$$C = \log_2 \left| \bar{\bar{I}} + \left( \bar{\bar{B}} \cdot \bar{\bar{R}}_n \cdot \bar{\bar{B}}^H \right)^{-1} \cdot P_s \cdot \bar{\bar{A}} \cdot \bar{\bar{A}}^H \right| \quad (4.9)$$

---

1

$$E \{ |x_{si}|^2 \} \leq P_s \quad i = 1, 2 \quad E \{ |x_r|^2 \} \leq P_r$$

Realizando los cálculos queda:

$$C_{AF3} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{\text{SNR}_{SD} \cdot (\text{SNR}_{SR} + 1) \cdot (2 + \text{SNR}_{SD}) + \text{SNR}_{RD} \cdot (\text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{SD})}{1 + \text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{RD}} \right] \quad (4.10)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_{d1}^2} \quad \text{SNR}_{SR} = \frac{P_s \cdot |h_{SR}|^2}{\sigma_r^2} \quad \text{SNR}_{RD} = \frac{P_r \cdot |h_{RD}|^2}{\sigma_{d2}^2}$$

## 4.2. DF

A partir de la Figura 4.1 y para el modo de funcionamiento DF, se tiene:

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR} = h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r \quad (4.11)$$

$$y_{SD} = h_{SD} \cdot x_{s1} + n_{d1} \quad (4.12)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y = h_{RD} \cdot x_r + h_{SD} \cdot x_{s2} + n_{d2} \quad (4.13)$$

En forma matricial y teniendo que se utiliza RC ( $x_r = \beta \cdot x_{s1}$ , siendo  $\beta = \sqrt{\frac{P_r}{P_s}}$ ):

$$\begin{pmatrix} y_{SD} \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{SD} & 0 \\ \beta \cdot h_{RD} & h_{SD} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_{d1} \\ n_{d2} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Tal y como se ha visto, la fuente envía una señal en el primer TS hacia el relay y el destino con tasa  $C_1$ . El relay decodifica la información recibida y transmite la señal correspondiente hacia el destino, al mismo tiempo la fuente envía información al destino durante el segundo TS de tasa  $C_2$ .

La tasa alcanzable  $C_1$  teniendo en cuenta al relay resulta:

$$C_1 \leq \frac{1}{2} \min \{ \log_2 (1 + \text{SNR}_{SR}), \log_2 (1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}) \} \quad (4.15)$$

La tasa alcanzable  $C_2$  teniendo en cuenta la comunicación entre los nodos fuente y destino resulta:

$$C_2 \leq \frac{1}{2} \log_2 \cdot (1 + \text{SNR}_{SD}) \quad (4.16)$$

Al sumar estos dos términos y tras comprobar que  $\text{SNR}_{SD} < \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}$ , el valor de la capacidad quedaría:

$$C_1 + C_2 \leq \frac{1}{2} \log_2 ((1 + \text{SNR}_{SD}) + (1 + \text{SNR}_{SR})) \quad (4.17)$$

Por otro lado, se puede ver este escenario como un sistema en el que se producen dos transmisiones simultáneas. Dado que el relay transmite en modo *Repetition Coding*:  $x_r = \beta \cdot x_{s1}$ , con  $\beta = \sqrt{\frac{P_r}{P_s}}$ . La Ec. 4.14 se puede reescribir:

$$\bar{y} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \bar{n} \quad (4.18)$$

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} h_{SD} & 0 \\ \beta \cdot h_{RD} & h_{SD} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

$$\bar{B} = \sigma_{di}^2 \cdot \bar{I} \quad (4.20)$$

Empleando la fórmula:  $C_1 + C_2 \leq \frac{1}{2} \log_2 \left| \bar{I} + \frac{P_s}{\sigma_{di}^2} \cdot \bar{A} \cdot \bar{A}^H \right|$ , se obtiene el siguiente valor para la capacidad:

$$C_1 + C_2 \leq \frac{1}{2} \log_2 ((1 + \text{SNR}_{SD}) \cdot (1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}) - \text{SNR}_{RD} \cdot \text{SNR}_{SD}) \quad (4.21)$$

Finalmente,

$$C_{DF3} = \frac{1}{2} \min \{ \log_2 ((1 + \text{SNR}_{SD}) + (1 + \text{SNR}_{SR})), \log_2 ((1 + \text{SNR}_{SD}) \cdot (1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}) - \text{SNR}_{RD} \cdot \text{SNR}_{SD}) \} \quad (4.22)$$



### 4.3. Resultados numéricos entorno sin desvanecimiento

#### 4.3.1. Capacidad y potencia

Al igual que en los dos escenarios anteriores, se supone que el exponente de pérdidas  $\alpha = 4$  es el que mejor modela el sistema de comunicación a estudiar, con un valor de 0.5 para la distancia normalizada entre los nodos de comunicación; con lo que  $h_{ij} = \sqrt{\frac{1}{0,5^4}}$ . En la Figura 4.2 se pueden observar los valores de capacidad obtenidos para los modos AF, DF y la transmisión sin relays.

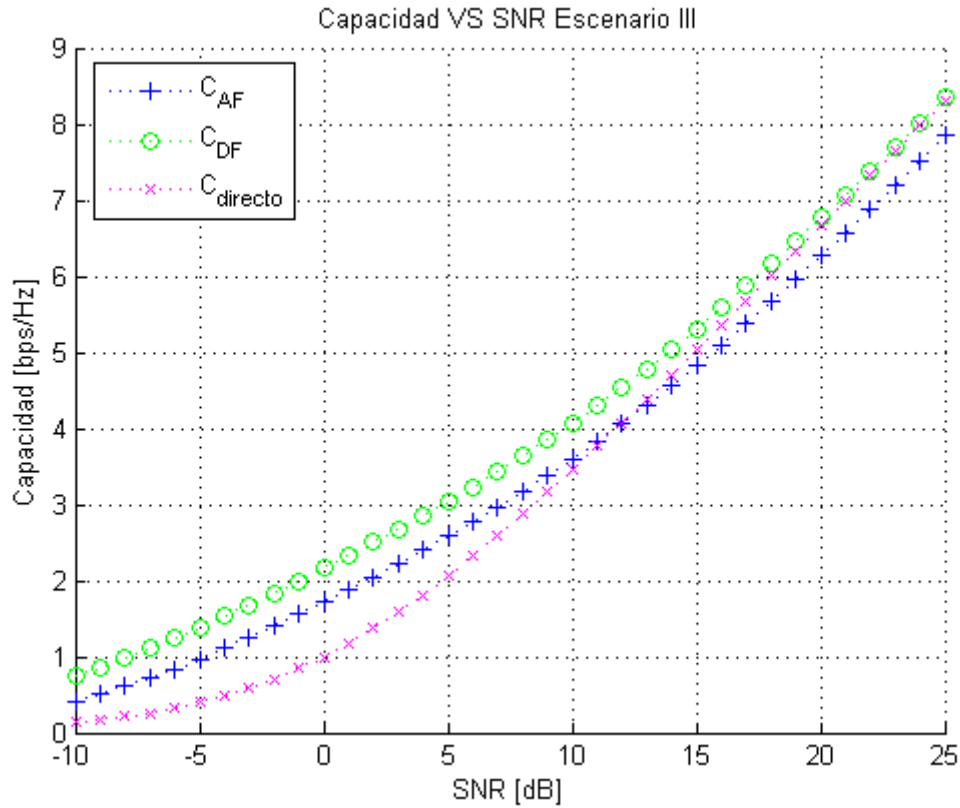


Figura 4.2: Capacidad VS SNR Escenario III, sin desvanecimiento

Se verifica cómo al aumentar el nivel de potencia, la capacidad del sistema aumenta. Se pueden distinguir 3 regiones:

$$\begin{aligned}
 \text{SNR} < 11,5\text{dB} &\rightarrow C_{DF} > C_{AF} > C_{directo} \\
 11,5\text{dB} < \text{SNR} < 23\text{dB} &\rightarrow C_{DF} > C_{directo} > C_{AF} \\
 \text{SNR} > 23\text{dB} &\rightarrow C_{directo} = C_{DF} > C_{AF}
 \end{aligned}$$

En este escenario, el modo DF consigue alcanzar los valores de capacidad ofrecidos por la transmisión directa para valores altos de SNR; con lo que se obtiene una mejora significativa con respecto a los dos escenarios anteriores (los relays no eran capaces de ofrecer dichos valores para valores altos de SNR).

En este caso la capacidad posee un comportamiento más similar tanto para los relays como para la transmisión directa.

#### 4.3.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

A continuación se simula una situación en la que las varianzas de ruido en los receptores valen uno y las potencias emitidas por los transmisores tiene valor 1[W]. La Figura 4.3 muestra los valores de capacidad obtenidos en función de la posición del relay (distancia entre fuente y destino igual a la unidad) y, así como en función del valor del exponente de pérdidas  $\alpha$ .

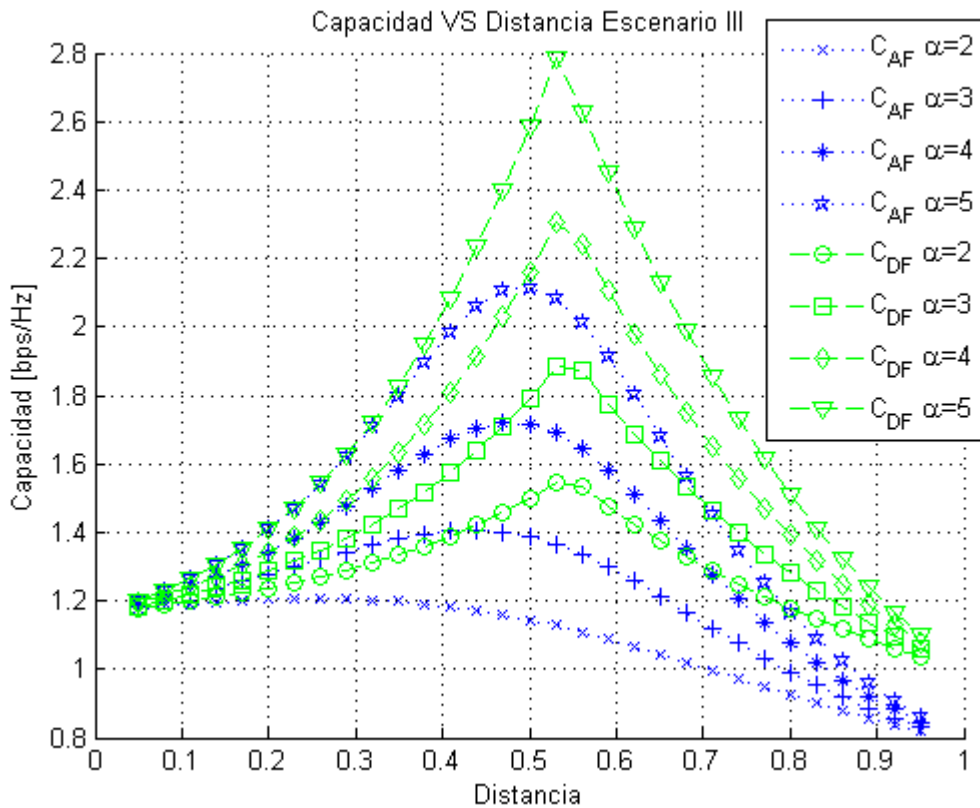


Figura 4.3: Capacidad VS Distancia Escenario III, sin desvanecimiento

En este caso no hay ningún tipo de simetría en torno al punto medio de separación para los valores de la capacidad (debido al funcionamiento del relay con una estrategia AF como con otra DF). Los valores alcanzados tanto en el modo DF como en el modo AF son superiores a los obtenidos en los escenarios anteriores. En ubicaciones del relay próximas a la fuente, apenas hay diferencia entre los modos AF y DF; sin embargo, para posiciones próximas al destino, el modo DF ofrece mejores resultados que el AF.

#### 4.3.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

Para el caso en el que la distancia entre el nodo fuente y el nodo destino valga cinco, manteniendo los valores de potencia y ruido del apartado anterior, se obtiene la simulación del relay en modo AF en la Figura 4.4:

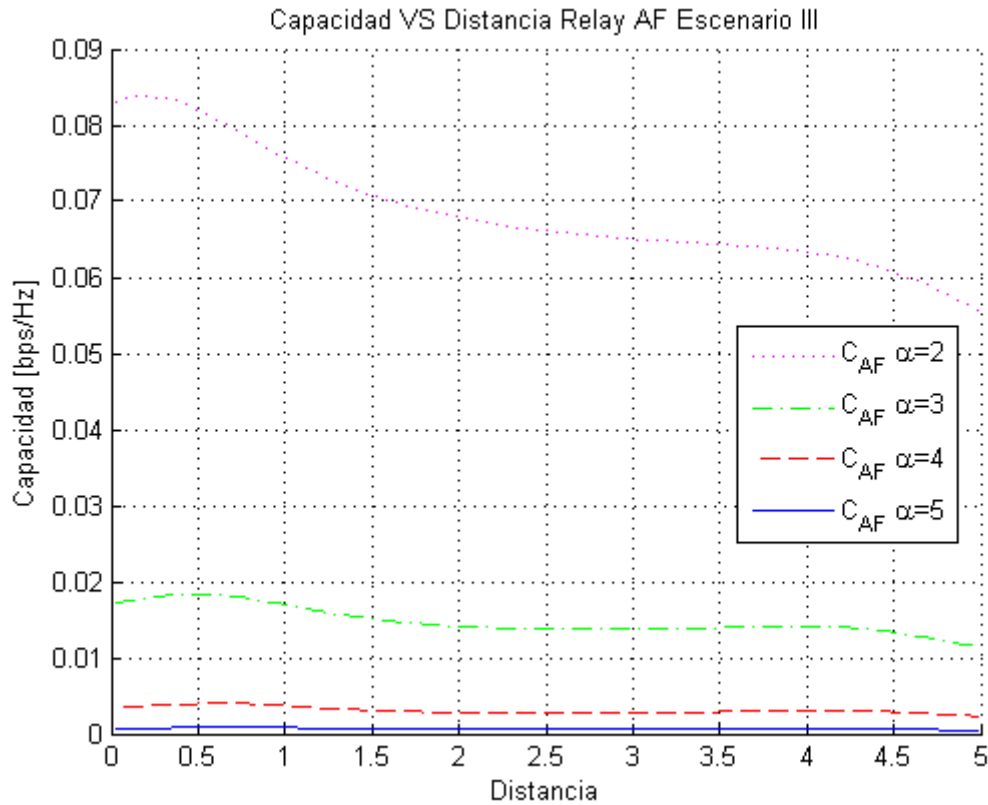


Figura 4.4: Capacidad VS Distancia Escenario III modo AF, sin desvanecimiento

El comportamiento de la capacidad es muy similar al obtenido en el Escenario II, aunque los valores son ligeramente superiores, en concreto, para valores pequeños de  $\alpha$  casi se duplican.

En cuanto al modo DF, la gráfica obtenida se muestra en la Figura 4.5:

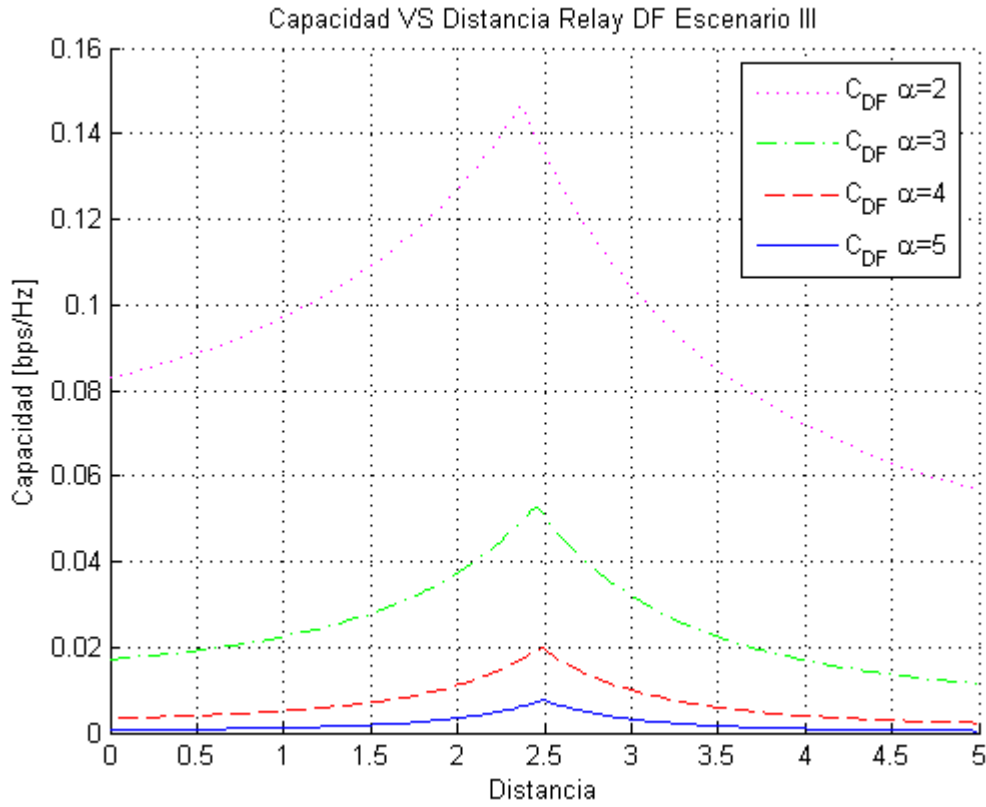


Figura 4.5: Capacidad VS Distancia Escenario III modo DF, sin desvanecimiento

Al igual que la simulación de la Figura 4.4, el modo DF también ofrece valores de capacidad mayores que en los dos escenarios anteriores y de manera más significativa para valores pequeños del exponente de pérdidas  $\alpha$ .

En la Figura 4.6, se observa el comportamiento de la capacidad en función de la posición del relay, el modo de funcionamiento y el valor de  $\alpha$ . Cabe destacar que para todos los valores  $\alpha$  se supera el valor de la capacidad en la transmisión directa (esto no ocurría en los dos escenarios anteriores), con lo que se produce una mejora significativa.

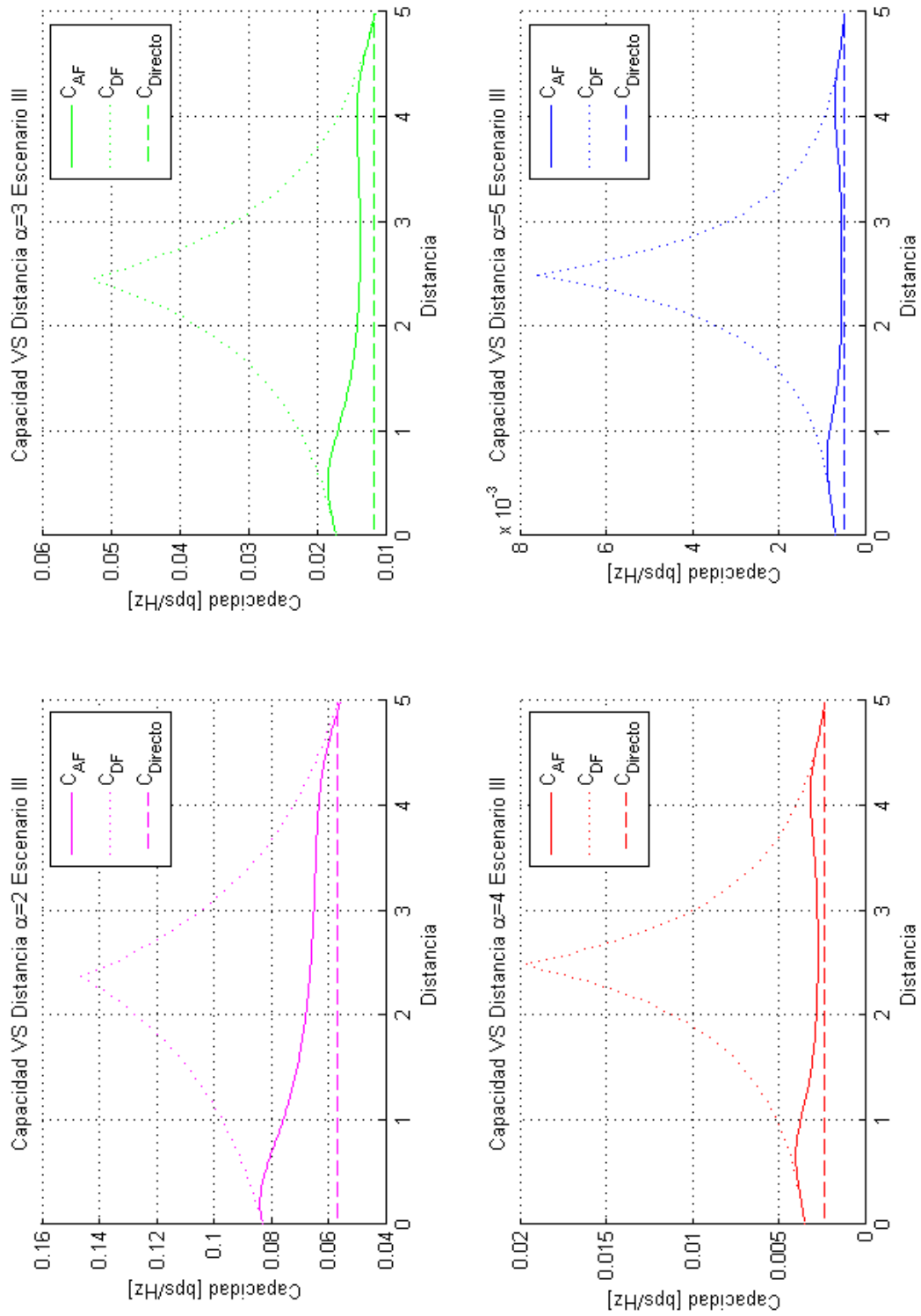


Figura 4.6: Capacidad VS Distancia Escenario III, exponente de pérdidas

A modo de recopilación, se muestra en la Figura 4.7 la comparación entre el Escenario III y la transmisión sin relay para potencias de 1[W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro y con distancia entre fuente y destino igual a uno.

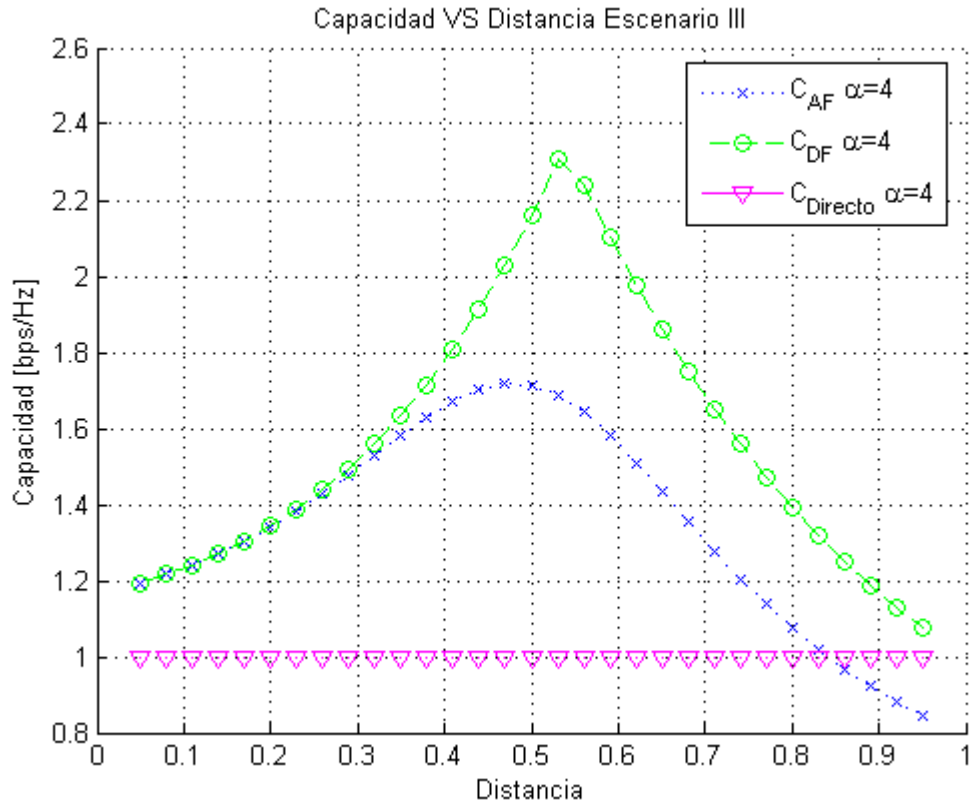


Figura 4.7: Capacidad VS Distancia Escenario III, sin desvanecimiento

#### 4.4. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

En las siguientes secciones se realizará un análisis semejante al que se hizo en el caso sin desvanecimiento.

##### 4.4.1. Capacidad y potencia

La Figura 4.8 muestra un comportamiento similar al caso sin desvanecimiento (se han utilizado los mismos valores que entonces), pero se destaca que la capacidad del modo DF es en torno a una décima superior a la del modo AF, y los valores de capacidad resultan ligeramente inferiores con respecto al caso sin desvanecimiento.

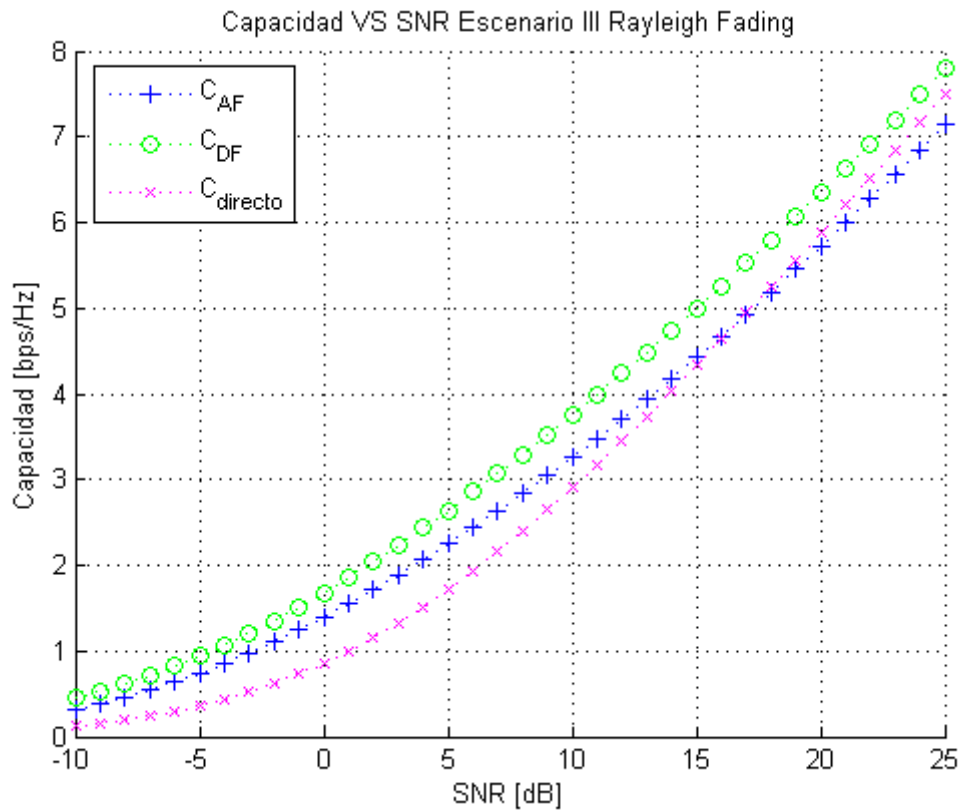


Figura 4.8: Capacidad VS SNR Escenario III, con desvanecimiento

En este caso, la capacidad ofrecida por el relay en modo DF difiere muy poco de la proporcionada por el modo AF. Se pueden distinguir 2 regiones:

$$\text{SNR} < 17,5\text{dB} \rightarrow C_{DF} > C_{AF} > C_{directo}$$

$$\text{SNR} > 17,5\text{dB} \rightarrow C_{directo} > C_{DF} > C_{AF}$$

#### 4.4.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

Se van a simular los mismos valores que en el caso ideal, normalizando a la unidad la distancia entre fuente y destino.

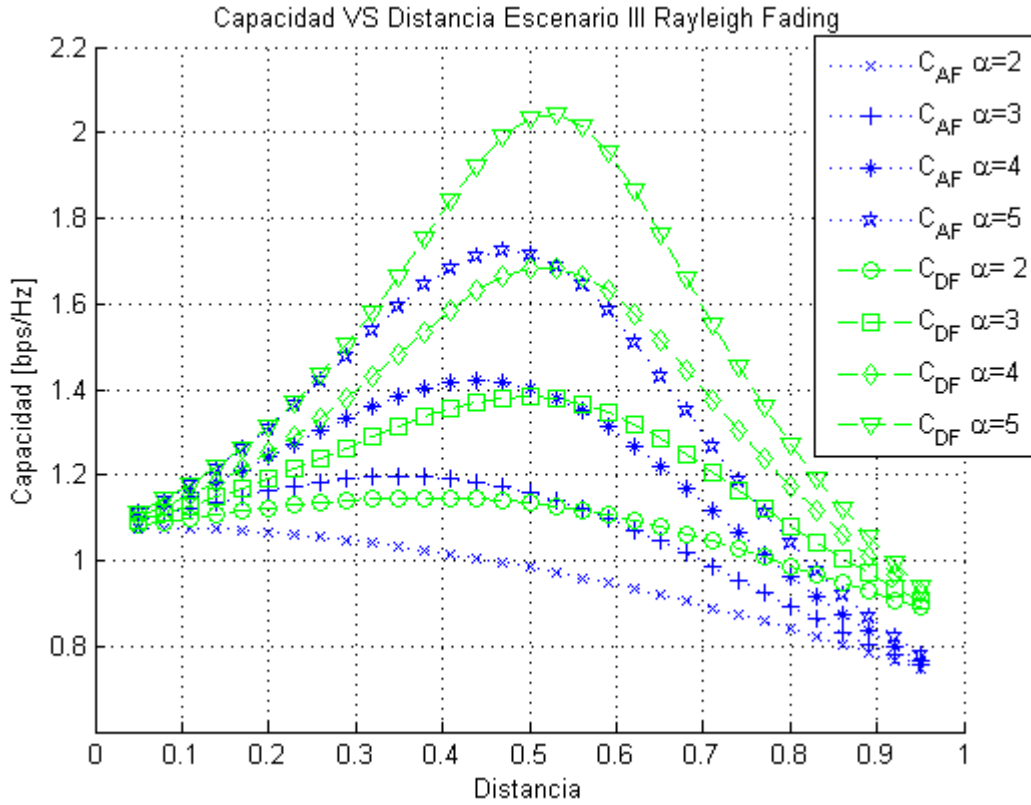


Figura 4.9: Capacidad VS Distancia Escenario III, con desvanecimiento

En este caso se obtienen valores de capacidad superiores, en torno a una décima, a los del caso sin desvanecimiento.

#### 4.4.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

A continuación se muestran los resultados para los modos AF y DF en el caso de simular una distancia mayor que la unidad entre fuente y destino al suponer desvanecimiento.



En el modo AF, Figura 4.10, se sigue obteniendo un mayor valor de capacidad en posiciones del relay cercanas a la fuente. Los valores son muy similares a los del caso sin desvanecimiento.

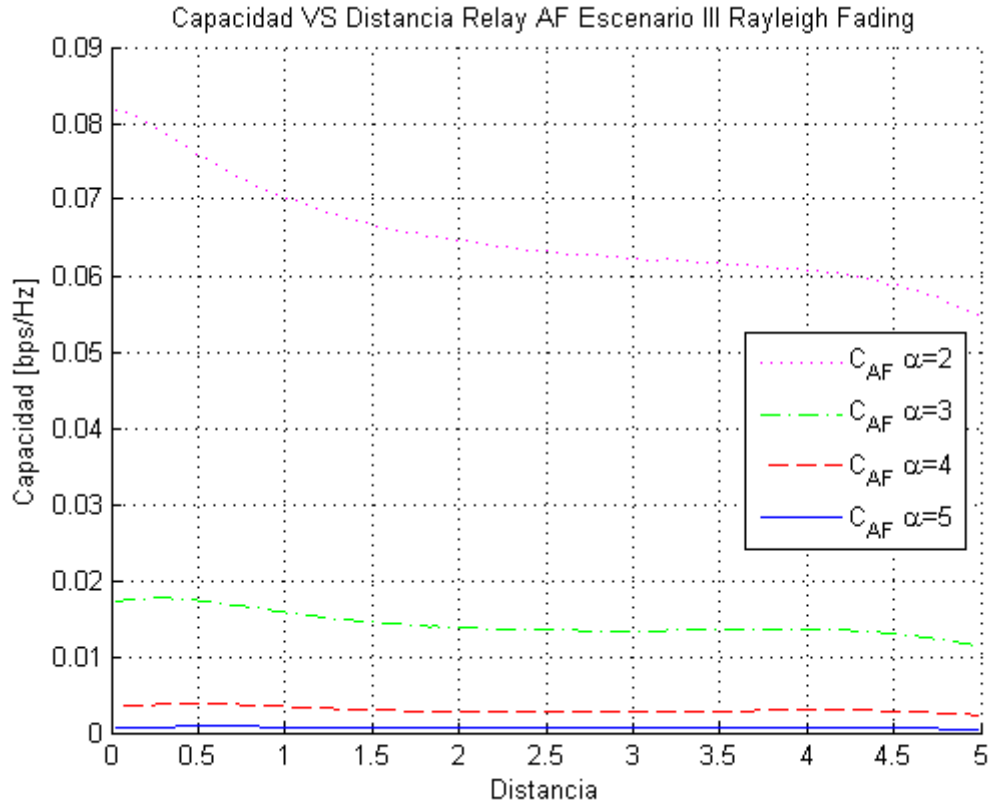


Figura 4.10: Capacidad VS Distancia Escenario III modo AF, con desvanecimiento

En el modo DF, Figura 4.11, las diferencias son más notables, las curvas ya no son tan picudas sino que se suavizan y los valores de la capacidad disminuyen al comparar con el caso sin desvanecimiento.

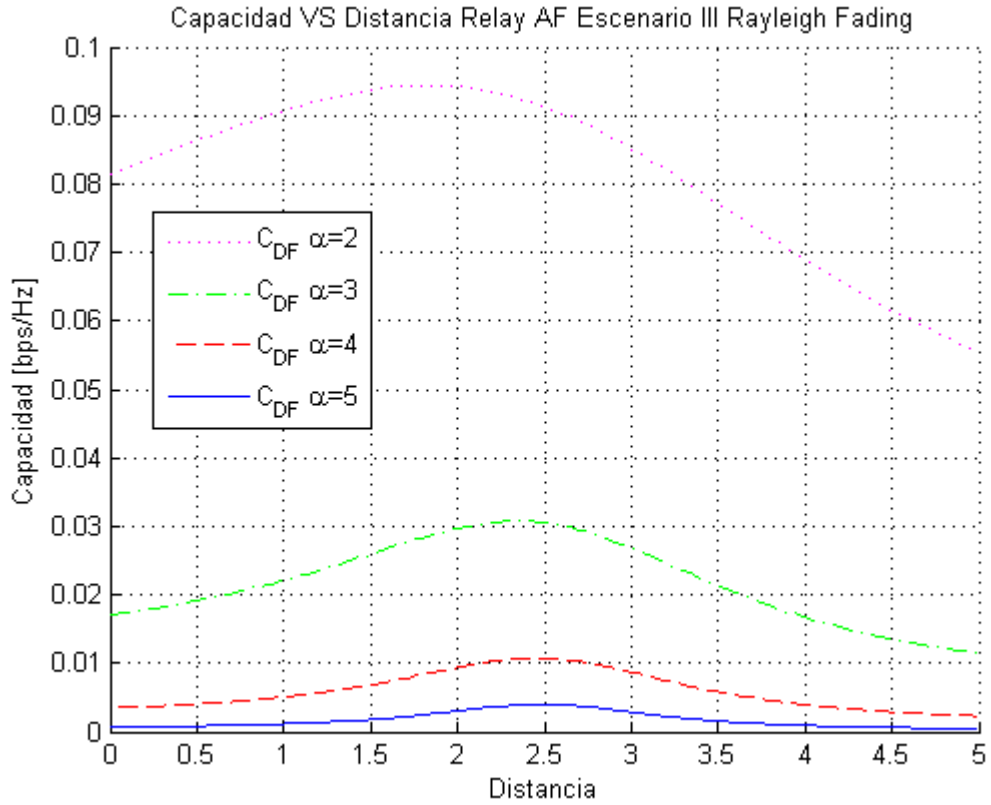


Figura 4.11: Capacidad VS Distancia Escenario III modo DF, con desvanecimiento

La Figura 4.12 detalla la influencia del exponente de pérdidas.

Tal y como ocurría en el caso sin desvanecimiento, este escenario ofrece mejores resultados que los anteriores dado que en cualquiera de los dos modos de funcionamiento se supera el valor de la capacidad de la transmisión directa.

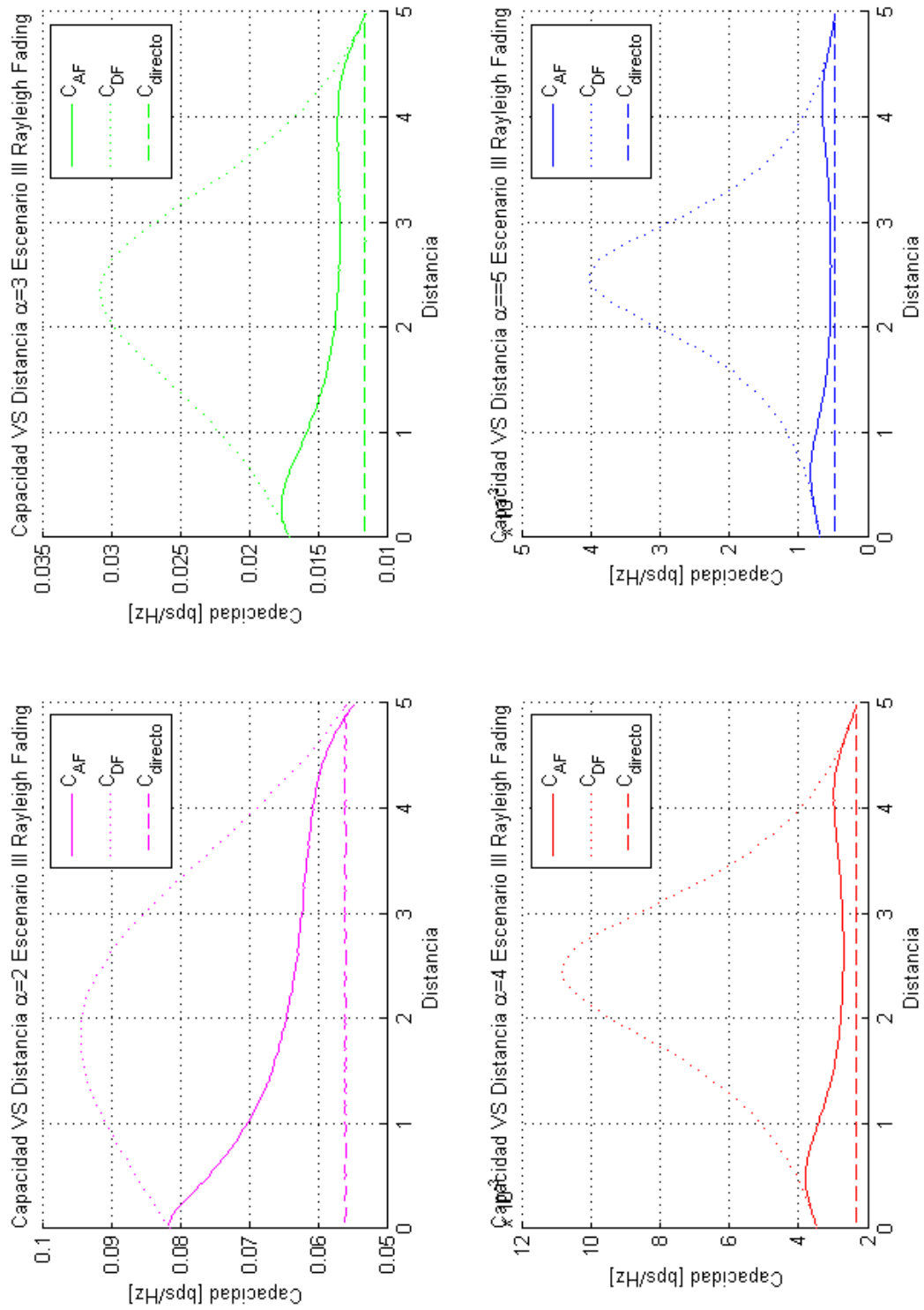


Figura 4.12: Capacidad VS Distancia Escenario III, exponente de pérdidas, desvanecimiento

En último lugar, se muestra (Figura 4.13) la comparativa entre el Escenario III y la transmisión sin relay. Se obtienen resultados similares a los del caso sin desvanecimiento.

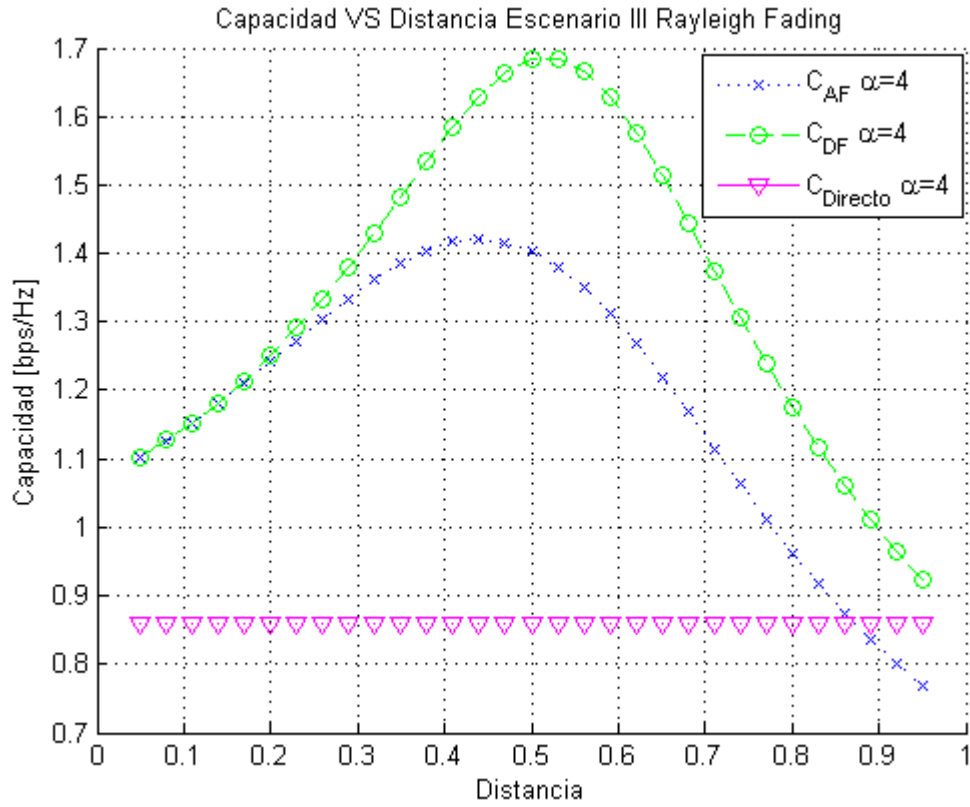


Figura 4.13: Capacidad VS Distancia Escenario III, con desvanecimiento

## ESCENARIO IV

### 5.1. AF

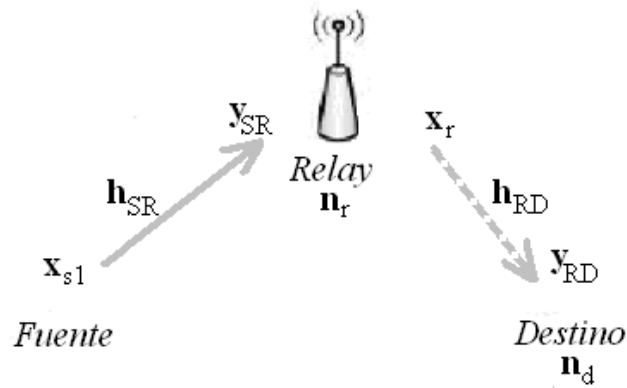


Figura 5.1: Escenario IV

Este escenario (Figura 5.1) se diferencia de los anteriores en que no se establece comunicación entre fuente y destino, de manera directa, en ningún TS.  $h_{SR}$ ,  $h_{RD}$  representan el efecto de las pérdidas en el trayecto entre los S (fuente) y R (relay), R y D (destino).  $n_d$  y  $n_r$  representan el ruido de media nula y varianzas  $\sigma_d^2$  y  $\sigma_r^2$  en los nodos D y R.

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR} = h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r \quad (5.1)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_{RD} = h_{RD} \cdot x_r + n_d \quad (5.2)$$

Dado que la estrategia es AF, el relay se encarga de amplificar la señal recibida por la fuente tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$x_r = f \cdot y_{SR} \quad (5.3)$$

Siendo  $f$  el factor de escalado obtenido a partir de las restricciones iniciales impuestas<sup>1</sup>:

$$P_r = f^2 \left( |h_{SR}|^2 \cdot P_s + \sigma_r^2 \right) \Rightarrow f = \sqrt{\frac{P_r}{|h_{SR}|^2 \cdot P_s + \sigma_r^2}} \quad (5.4)$$

Tras sustituir el factor de escalado en la Ec. 5.2, la señal recibida en el destino,  $y_{RD}$ , durante el segundo TS queda:

$$y_{RD} = h_{RD} \cdot f \cdot (h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r) + n_d \quad (5.5)$$

De manera más compacta se pueden resumir las ecuaciones anteriores en modo matricial:

$$\bar{y} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \bar{n} \quad (5.6)$$

$$y_{RD} = \begin{pmatrix} h_{SR} \cdot f \cdot h_{RD} \end{pmatrix} \cdot x_{s1} + \begin{pmatrix} f \cdot h_{RD} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_r \\ n_d \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

Para el cálculo de la capacidad en este escenario se va hacer uso de la siguiente expresión[11]:

$$C = \log_2 \frac{|\bar{R}_y|}{|\bar{R}_n|} = \log_2 \left| \bar{I} + \left( \bar{B} \cdot \bar{R}_n \cdot \bar{B}^H \right)^{-1} \cdot P_s \cdot \bar{A} \cdot \bar{A}^H \right| \quad (5.8)$$

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF4} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{\text{SNR}_{SR} \cdot \text{SNR}_{RD}}{1 + \text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{RD}} \right] \quad (5.9)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos *time slots*. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:  $\text{SNR}_{SR} = \frac{P_s \cdot |h_{SR}|^2}{\sigma_r^2}$   $\text{SNR}_{RD} = \frac{P_r \cdot |h_{RD}|^2}{\sigma_d^2}$

Como comprobación del resultado obtenido, se podría suponer que el término  $\text{SNR}_{SD}$  es nulo en los tres escenarios anteriores (Ec. 2.10, Ec. 3.9 y Ec. 4.10), comprobándose que los resultados coinciden con el de la Ec. 5.9.

---

1

$$E \{ |x_s|^2 \} \leq P_s \quad E \{ |x_r|^2 \} \leq P_r$$

## 5.2. DF

A continuación se plantea el sistema de ecuaciones que rigen la comunicación entre nodos para el modo de funcionamiento DF (ver Figura 5.1).

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR} = h_{SR} \cdot x_{s1} + n_r \quad (5.10)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_{RD} = h_{RD} \cdot x_r + n_d \quad (5.11)$$

Dado que la implementación escogida para el modo DF es RC, se cumple que:  $x_r = \beta \cdot x_{s1}$ , siendo  $\beta = \sqrt{\frac{P_r}{P_s}}$ . Por tanto, de manera matricial queda:

$$y_{RD} = \begin{pmatrix} \beta \cdot h_{RD} \end{pmatrix} \cdot x_{s1} + \begin{pmatrix} n_r \\ n_d \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

Para calcular el valor de la capacidad en el modo de funcionamiento DF se podría proceder como en los escenarios anteriores. Sin embargo, de manera directa, al suponer que el término  $\text{SNR}_{SD}$  es nulo, al sustituirlo en las ecuaciones 2.19, 3.14 y 4.22 se obtendría:

$$C_{DF4} = \frac{1}{2} \min \{ \log_2 (1 + \text{SNR}_{RD}), \log_2 (1 + \text{SNR}_{SR}) \} \quad (5.13)$$

### 5.3. Resultados numéricos entorno sin desvanecimiento

#### 5.3.1. Capacidad y potencia

En esta simulación se va considerar que la separación entre cada uno de los nodos vale 0.5, el coeficiente  $\alpha = 4$  y las pérdidas en el trayecto:  $h_{SR} = h_{SD} = h_{RD} = \sqrt{\frac{1}{0,5^4}}$ . Las varianzas de ruido serán iguales  $\sigma_d^2 = \sigma_r^2 = 1$  y las potencias transmitidas por la fuente y el relay irán creciendo a la par.

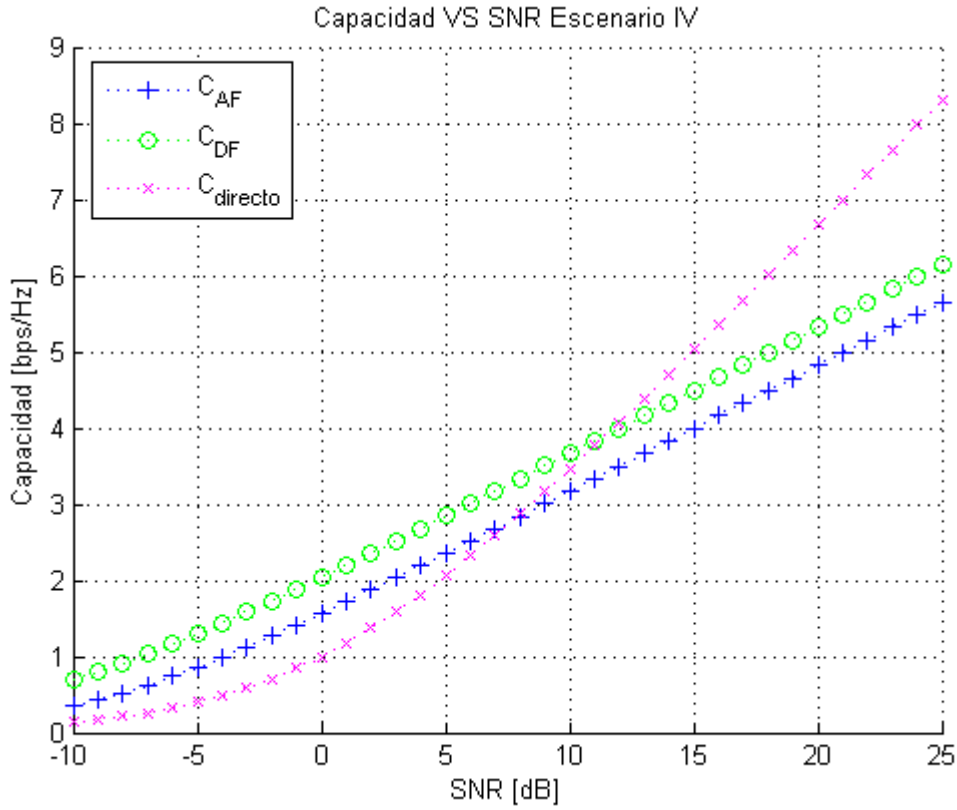


Figura 5.2: Capacidad VS Potencia Escenario IV, sin desvanecimiento

La Figura 5.2 muestra los resultados obtenidos. Tal y como cabía esperar, conforme el nivel de potencia aumenta la capacidad del sistema aumenta. Se pueden distinguir 3 regiones:

$$\begin{aligned}
 SNR < 8dB &\rightarrow C_{DF} > C_{AF} > C_{directo} \\
 8dB < SNR < 11,5dB &\rightarrow C_{DF} > C_{directo} > C_{AF} \\
 SNR > 11,5dB &\rightarrow C_{directo} > C_{DF} > C_{AF}
 \end{aligned}$$

El comportamiento es similar al de los Escenarios I y II.



### 5.3.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

Se va a simular el caso en el que las potencias emitidas por la fuente y por el relay valgan 1[W] y las varianzas de ruido sean iguales a la unidad. Se va a normalizar a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que el relay se ubique en cualquier posición intermedia.

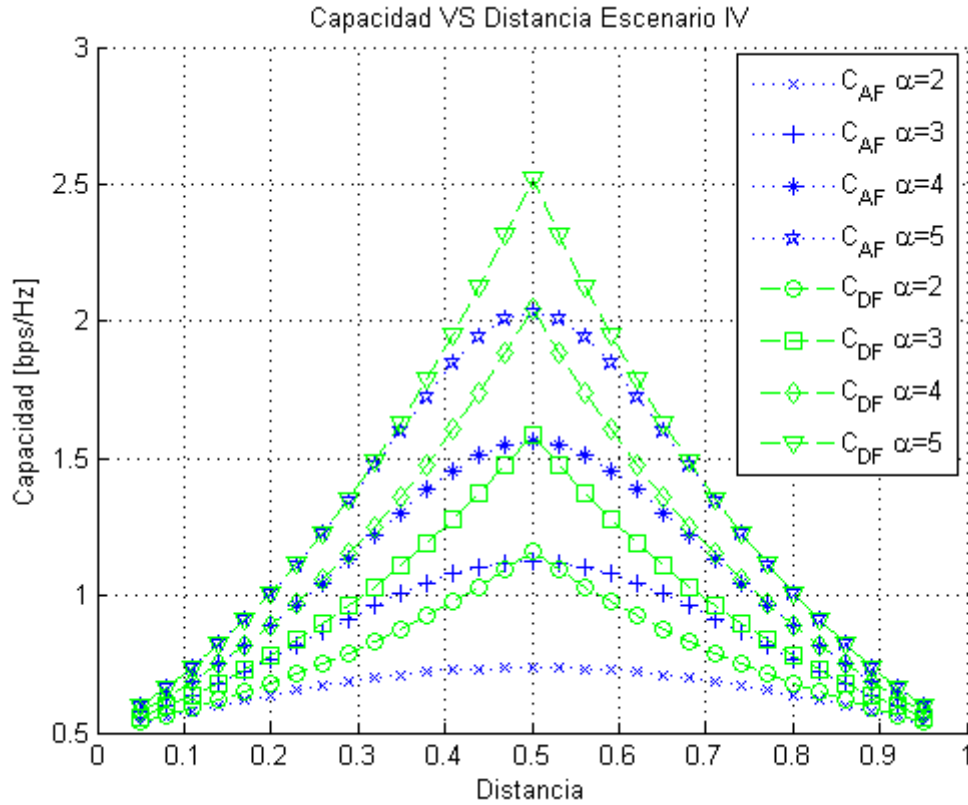


Figura 5.3: Capacidad VS Distancia Escenario IV, sin desvanecimiento

En la Figura 5.3 se observa cómo para un esquema AF el valor máximo de capacidad se obtiene siempre para  $d = 0,5$  (punto medio de separación entre fuente y destino). La capacidad disminuye de manera simétrica conforme el relay se aleja de dicho punto medio, debido al propio funcionamiento del relay, ya que la potencia de la fuente coincide con la del relay y según la distancia aumenta entre transmisor y relay, se ve disminuida entre relay y receptor.

En el modo DF ocurre lo mismo que en el AF, hay simetría debido al propio funcionamiento del relay, ya que si  $\text{SNR}_{SR}$  aumenta,  $\text{SNR}_{RD}$  disminuye en la misma proporción, y viceversa.

### 5.3.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

A continuación, se muestra el valor de la capacidad con el relay en modo AF y con una distancia entre fuente y destino de valor 5 unidades. En la Figura 5.4 se observa cómo aparecen dos puntos máximos y uno mínimo de capacidad. Conforme se separa al relay de la distancia intermedia entre fuente y destino (valor mínimo de capacidad), la capacidad aumenta de manera simétrica hasta alcanzar los valores máximos, para disminuir posteriormente (tal y como ocurría en los escenarios anteriores).

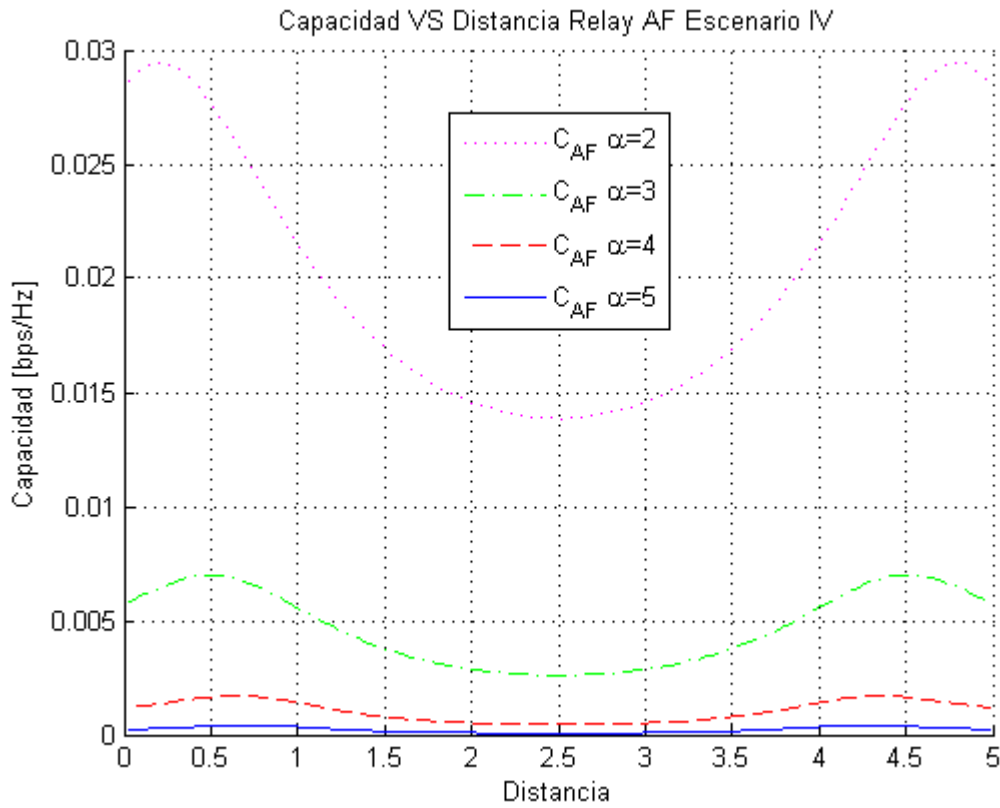


Figura 5.4: Capacidad VS Distancia Escenario IV modo AF, sin desvanecimiento

El valor de la capacidad se maximiza en posiciones del relay cercanas tanto al transmisor como al receptor. Por otro lado, se verifica cómo al aumentar el valor del exponente  $\alpha$ , la capacidad disminuye y los valores de capacidad resultan más similares entre el mínimo y los máximos.

En el esquema DF (Figura 5.5) se observa el comportamiento simétrico y que la máxima capacidad se alcanza en la distancia media. Se cumple que al aumentar las pérdidas la capacidad se hace menor.

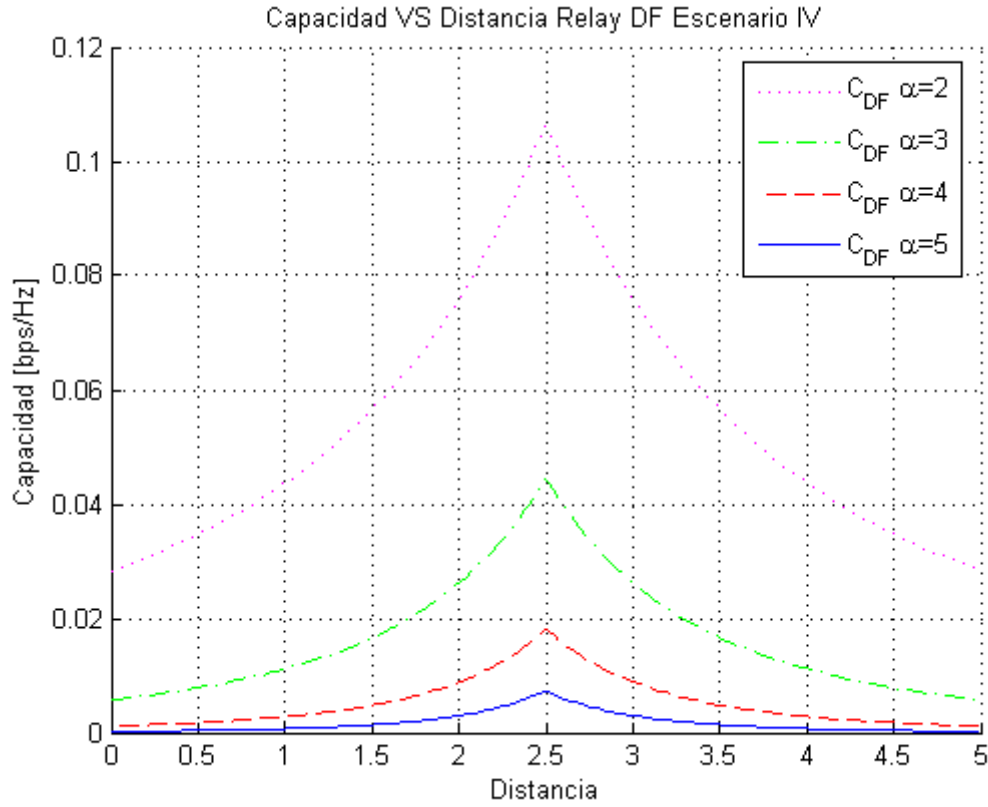


Figura 5.5: Capacidad VS Distancia Escenario IV modo DF, sin desvanecimiento

La Figura 5.6 demuestra que no siempre una estrategia cooperativa con relay ofrecerá mejores prestaciones que un enlace directo. Cabe destacar que para un valor de  $\alpha = 4$ , el modo de funcionamiento AF no llega a superar al valor de capacidad ofrecida por una transmisión sin relay.

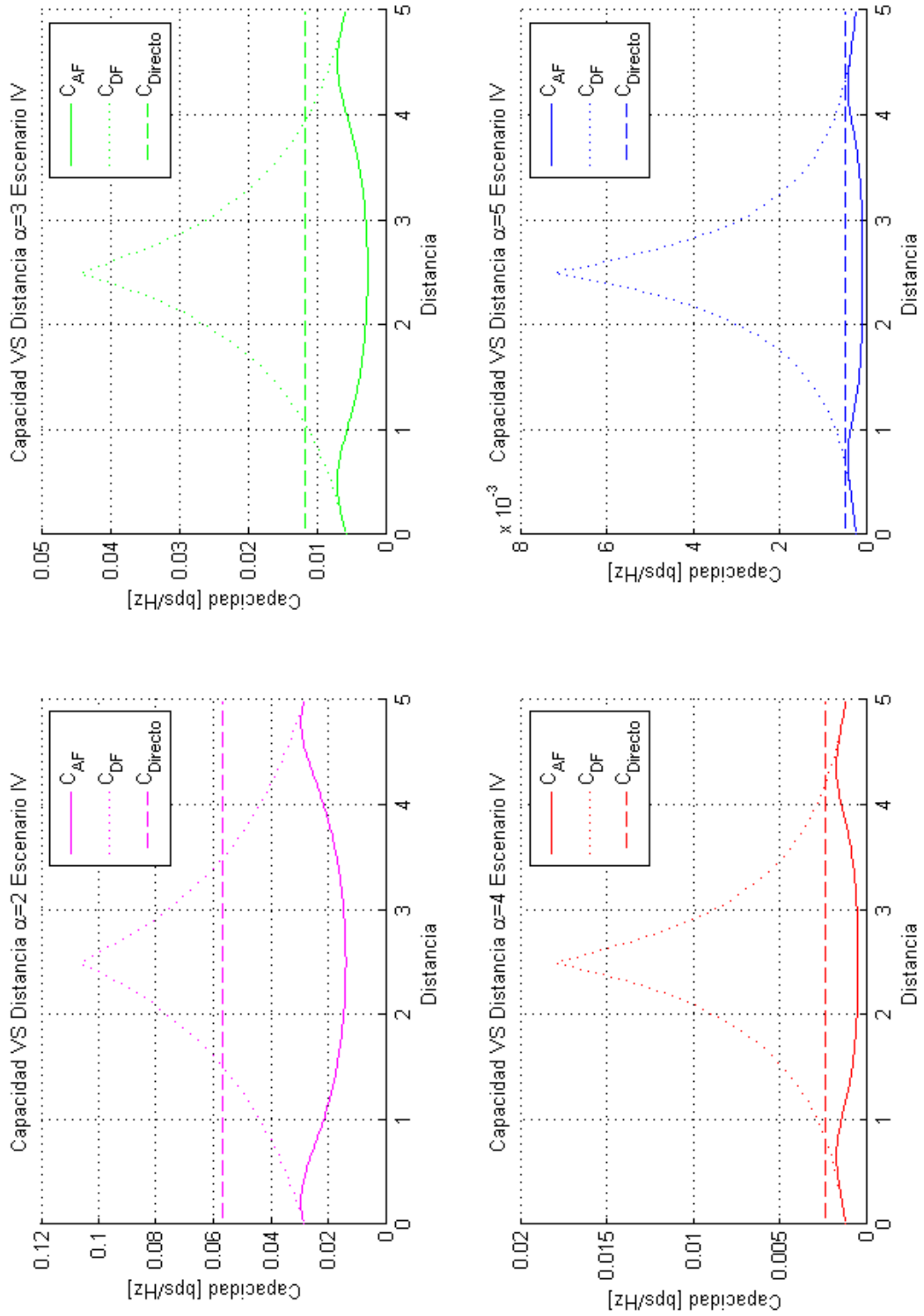


Figura 5.6: Capacidad VS Distancia Escenario IV, exponente de pérdidas

Por último, se muestra (Figura 5.7) una comparativa entre el Escenario IV y la transmisión sin relay para potencias de valor 1[W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

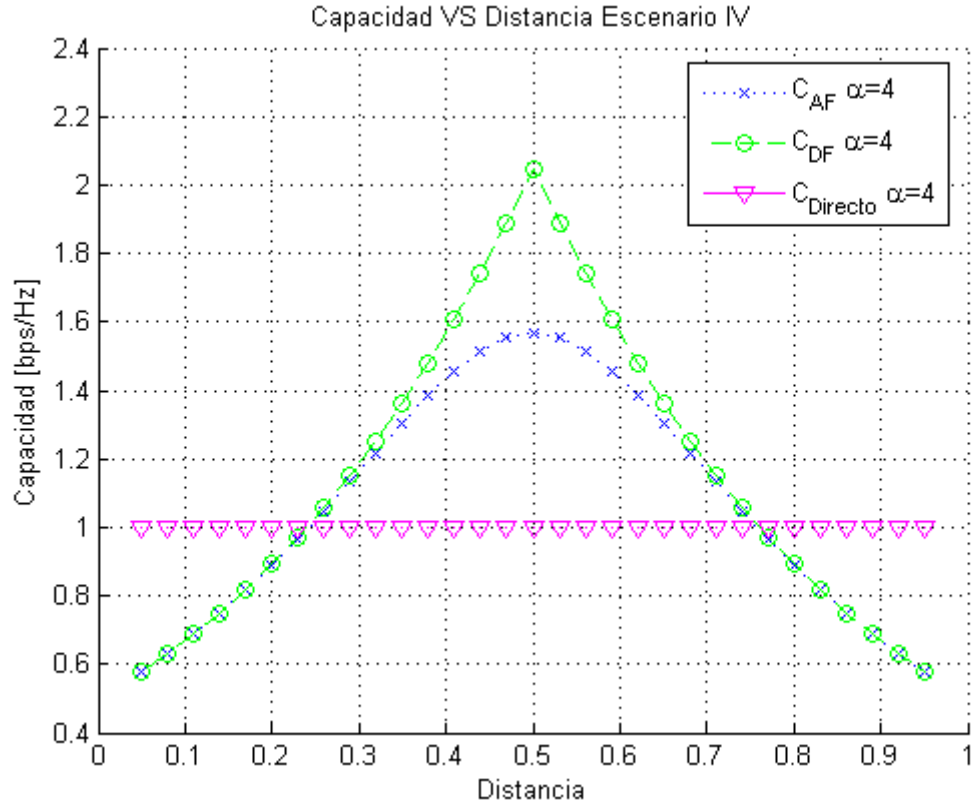


Figura 5.7: Capacidad VS Distancia Escenario IV, sin desvanecimiento

## 5.4. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

### 5.4.1. Capacidad y potencia

Se va simular el mismo caso que en la Figura 5.2 pero introduciendo desvanecimiento en los canales (tal y como se hizo en los escenarios anteriores).

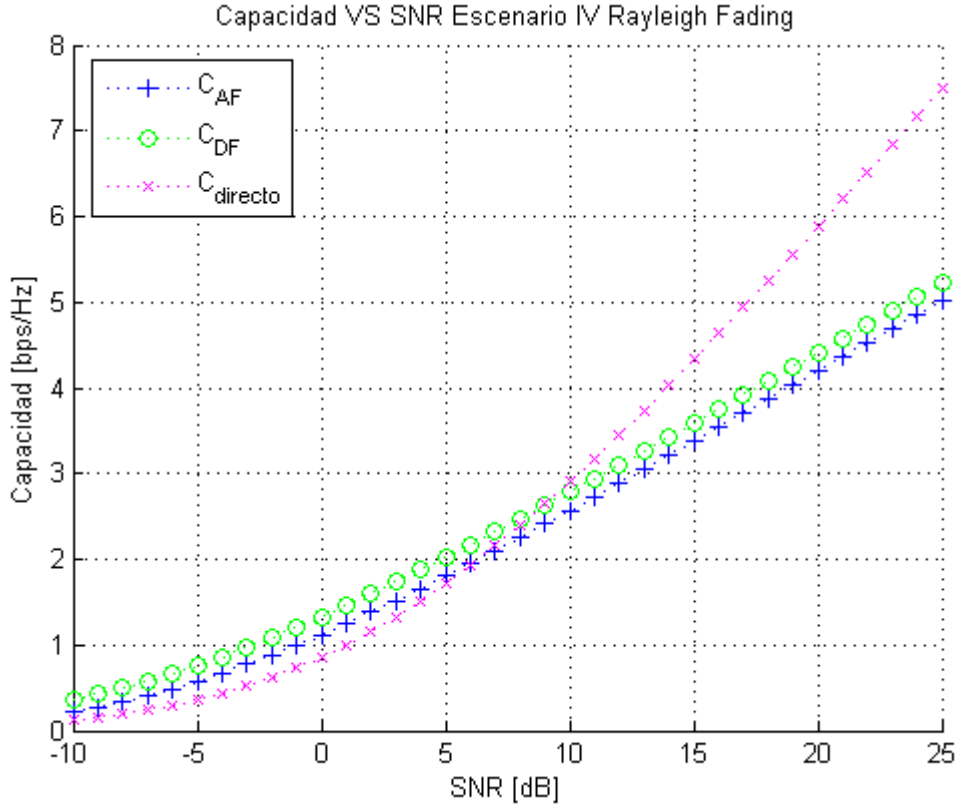


Figura 5.8: Capacidad VS Potencia Escenario IV, con desvanecimiento

La Figura 5.8 muestra un comportamiento similar al caso sin desvanecimiento, sin embargo los valores de capacidad para los modos de funcionamiento DF y AF disminuyen en torno a un 15 %. Los valores para la transmisión sin relay también disminuyen. Se pueden distinguir 3 regiones:

$$\text{SNR} < 6\text{dB} \rightarrow C_{DF} > C_{AF} > C_{directo}$$

$$6\text{dB} < \text{SNR} < 9\text{dB} \rightarrow C_{DF} > C_{directo} > C_{AF}$$

$$\text{SNR} > 9\text{dB} \rightarrow C_{directo} > C_{DF} > C_{AF}$$

### 5.4.2. Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

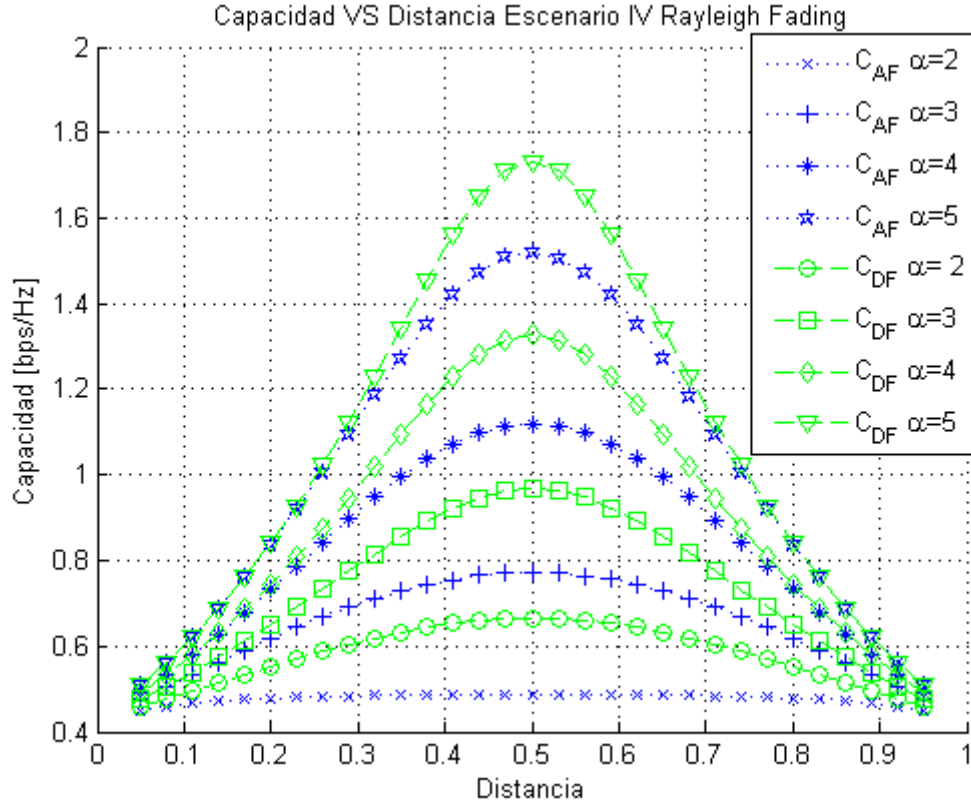


Figura 5.9: Capacidad VS Distancia Escenario IV, con desvanecimiento

En la Figura 5.9 se observa la disminución de los valores de capacidad y cómo el comportamiento de la capacidad en el caso del relay en modo DF se vuelve más picudo en torno a su valor máximo.

### 5.4.3. Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

Para el modo de funcionamiento AF, en la Figura 5.10 se observa cómo tanto los valores máximos como los mínimos disminuyen de valor en comparación con el caso sin desvanecimiento, con lo que el comportamiento de la capacidad es más uniforme.

En el modo DF, Figura 5.11, de igual manera, los valores de la capacidad son menores a los del caso sin desvanecimiento.

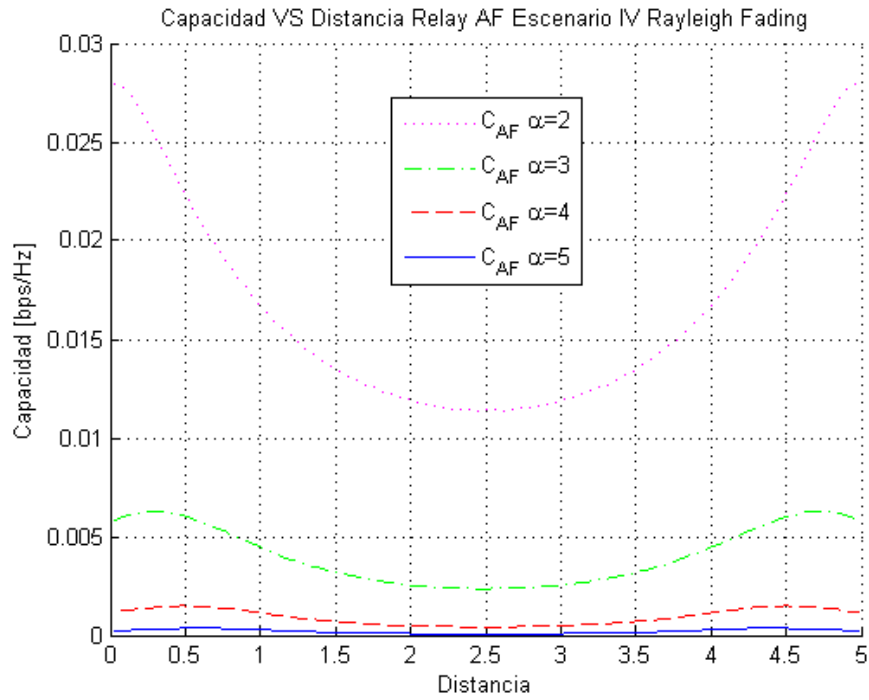


Figura 5.10: Capacidad VS Distancia Escenario IV modo AF, con desvanecimiento

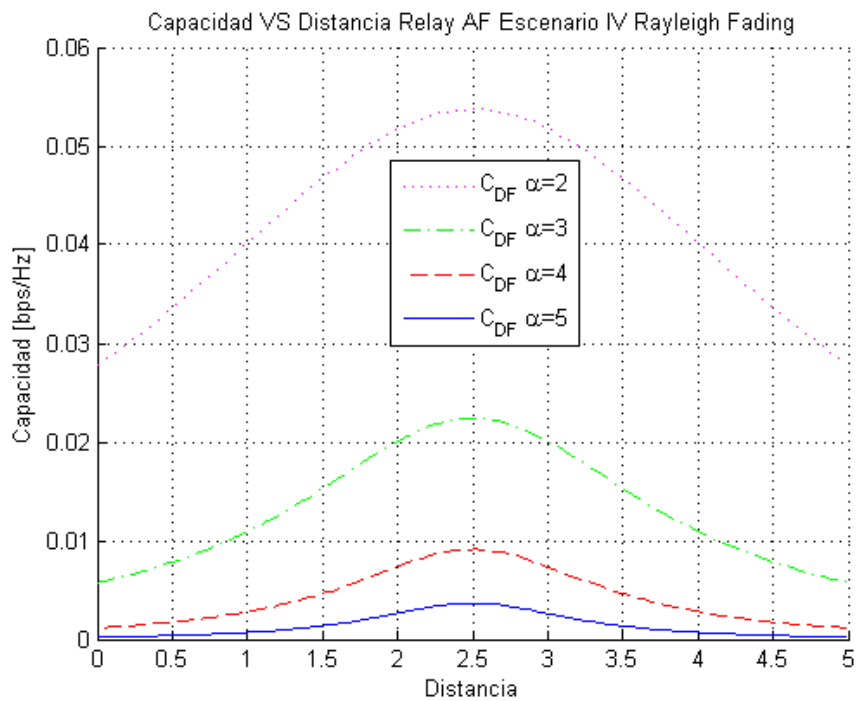


Figura 5.11: Capacidad VS Distancia Escenario IV modo DF, con desvanecimiento



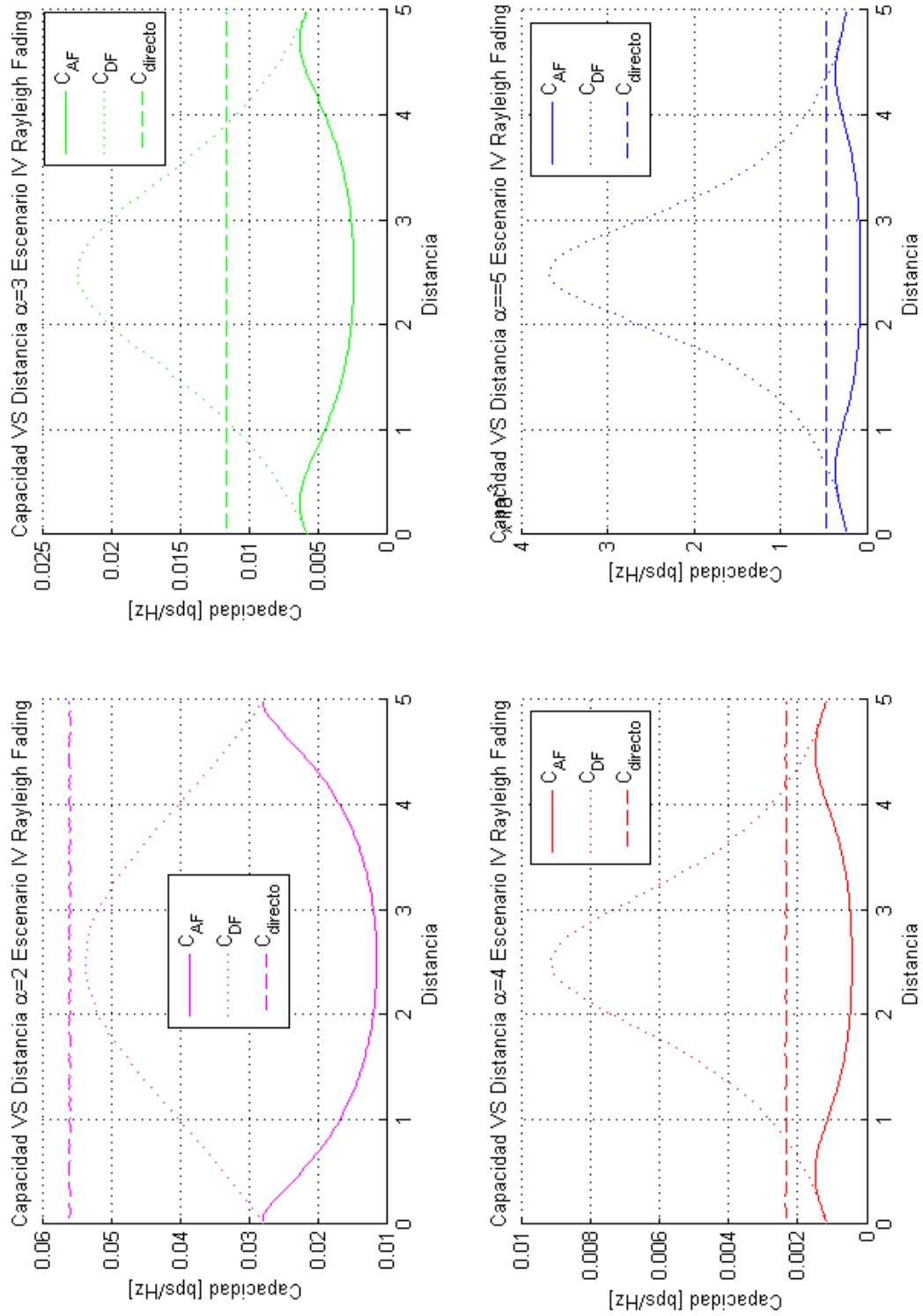


Figura 5.12: Capacidad VS Distancia Escenario IV, exponente de pérdidas, desvanecimiento

La Figura 5.12 detalla la influencia del exponente de pérdidas. Se destaca el caso en el que el valor de  $\alpha$  es 2, ya que ni el modo AF ni el DF son capaces de alcanzar en ninguna posición del relay los valores de capacidad de la transmisión directa. Para el valor  $\alpha = 4$ , el modo AF no alcanza nunca a la transmisión directa.

Por último, se muestra (Figura 5.13) la comparativa entre el Escenario IV y la transmisión sin relay. Se obtienen resultados similares a los del caso sin desvanecimiento.

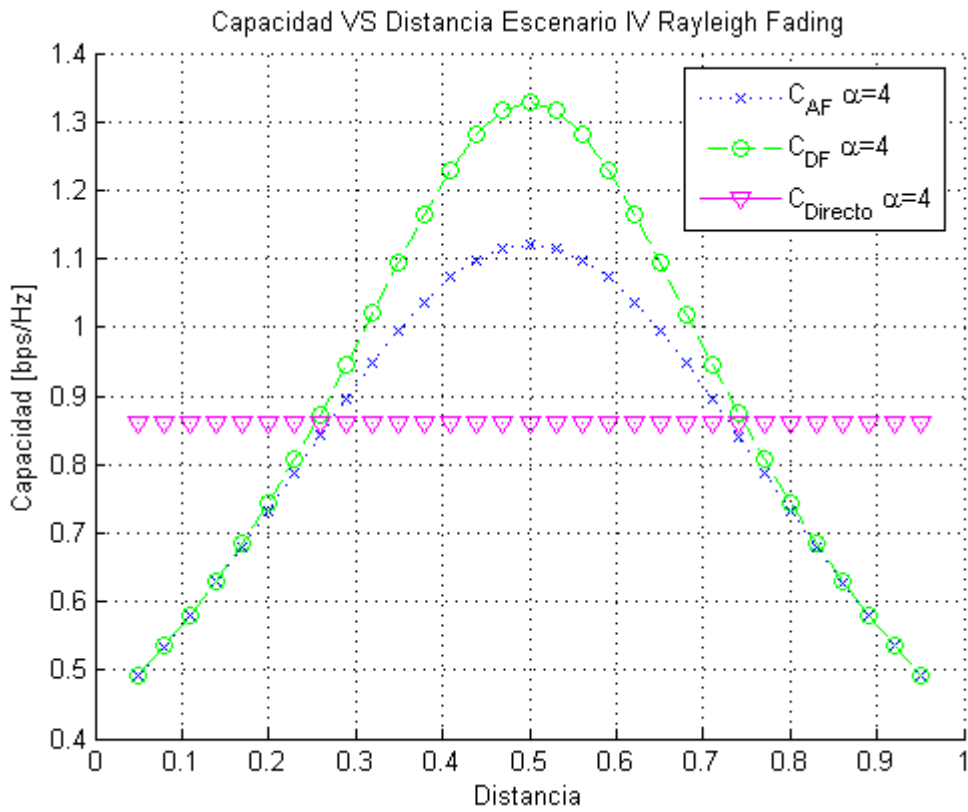


Figura 5.13: Capacidad VS Distancia Escenario IV, con desvanecimiento

## MÚLTIPLES RELAYS

La extensión del canal con un único relay en [3] al escenario con múltiples relays paralelos ha suscitado grandes esfuerzos [16], [17] y [18]. La capacidad del canal relay múltiple constituye todavía un problema abierto en el campo de la *Teoría de la Información*. No obstante, se han analizado y establecido límites, en términos de tasas alcanzables, para algunas de las estrategias de los relays, entre ellas:

- DF: Presentada en [3] para un único relay y extendida para múltiples relays en [19].
- CF: Presentada también en [3], cada relay retransmite una versión comprimida de la señal que recibe a la entrada. Es extendida para múltiples relays en [19].
- AF: Cada relay transmite una versión amplificada de la señal recibida desde la fuente. Su principal defecto consiste en la amplificación del ruido.

La técnica que va a ser estudiada de aquí en adelante es AF y el objetivo será el de analizar el comportamiento de la capacidad tal y como se hizo en los cuatro escenarios anteriores, pero añadiendo al sistema un relay más en paralelo. Al incorporar un nuevo nodo, los grados de libertad para el análisis aumentan, por ejemplo: el número de TS empleados en la comunicación o el desplazamiento de los relays. Sin embargo, para poder establecer una comparación justa con los escenarios ya presentados, se va a suponer que se emplean dos únicos TS y el desplazamiento de los dos relays es simultáneo, estando ambos ubicados a igual distancia de los nodos de comunicación.

En cuanto al receptor, al llegarle simultáneamente varias señales independientes procedentes de los relays y de la fuente, se propone:

- Sumar las señales en amplitud (receptor coherente).
- Sumar las señales en potencia (receptor no coherente).

## 6.1. Escenarios

Al igual que se hizo en el sistema en el que sólo había un relay, se va a realizar un estudio comparativo de cuatro escenarios en los que se emplearán dos relays en modo AF *half-duplex*.

### ▪ ESCENARIO I'

En el escenario I' la fuente transmite información tanto a los dos relays como al destino en el primer TS; mientras que únicamente los relays se comunicarán con el destino en el segundo TS. Este escenario tiene una estructura similar a la de un canal BC durante el primer TS (Fuente  $\rightarrow$  Relay1, Relay2, Destino); y a la de un canal MAC durante el segundo TS (Relay1, Relay2  $\rightarrow$  Destino).

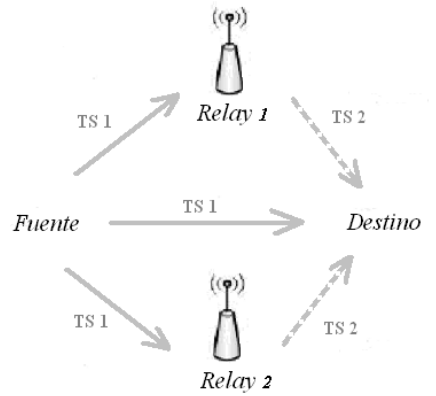


Figura 6.1: Escenario I'

- ESCENARIO II'

En el caso del escenario II' la fuente se comunica únicamente con los dos relays durante el primer TS. En el segundo TS tendrá lugar la transferencia de información entre relays-destino, y entre fuente-destino. En esta situación, se tiene una estructura similar a la de un canal BC durante el primer TS (Fuente  $\rightarrow$  Relay1, Relay2); y a la de un canal MAC durante el segundo TS (Relay1, Relay2, Fuente  $\rightarrow$  Destino).

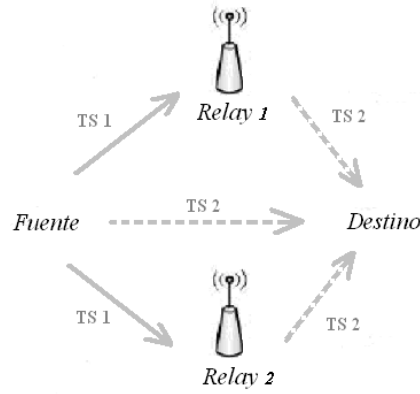


Figura 6.2: Escenario II'

■ ESCENARIO III'

El escenario III' puede verse como la combinación entre los dos escenarios anteriores, dado que durante el primer TS habrá comunicación entre fuente-relays y fuente-destino, y en el segundo TS entre relays-destino y fuente-destino. Por tanto, se tiene una estructura similar a la de un canal BC durante el primer TS (Fuente  $\rightarrow$  Relay1, Relay2, Destino); y a la de un canal MAC durante el segundo TS (Relay1, Relay2, Fuente  $\rightarrow$  Destino).

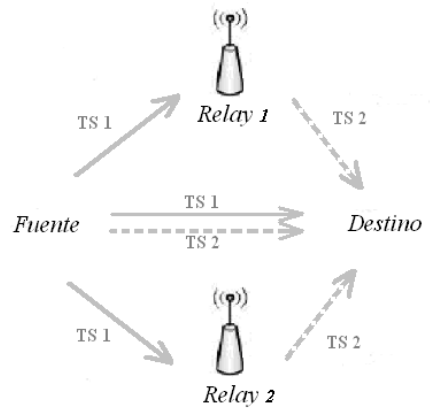


Figura 6.3: Escenario III'

- ESCENARIO IV'

Por último, en el escenario IV' se va a asumir que no existe transferencia de información desde la fuente hacia el destino de manera directa, así la fuente se comunicará con los dos relays en el primer TS y en el TS siguiente los relays transmitirán hacia el destino. Este escenario tiene una estructura similar a la de un canal BC durante el primer TS (Fuente  $\rightarrow$  Relay1, Relay2); y a la de un canal MAC durante el segundo TS (Relay1, Relay2  $\rightarrow$  Destino).

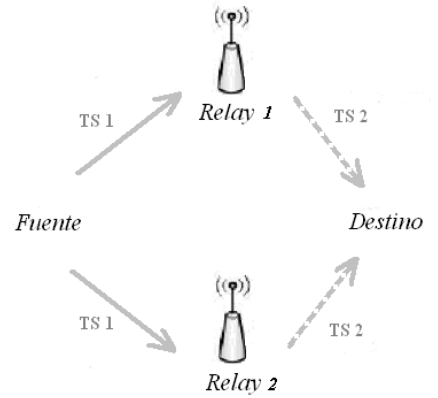


Figura 6.4: Escenario IV'

En estos escenarios se suman las señales en amplitud en el receptor. En el caso de sumar en potencia, las figuras son equivalentes, sólo se verá modificado el cálculo de la capacidad, dando lugar a los escenarios: I', II'', II'' y IV''.





## 2 RELAYS: RECEPTOR SUMA SEÑALES EN AMPLITUD

Este capítulo contiene, para todos los escenarios en los que hay dos relays y las señales se suman en amplitud en el receptor, un análisis teórico y práctico. En la parte teórica se estudia el modo de funcionamiento AF con el objetivo de obtener la expresión general de la capacidad. En la parte práctica, se particularizarán valores de la capacidad en función de: la potencia emitida por la fuente y el relay, así como la posición del relay; en los casos en los que haya desvanecimiento.

### 7.1. ESCENARIO I'

#### 7.1.1. AF

En este modelo *half-duplex* (ver Figura 7.1),  $x_{s1}$  denota la señal transmitida por la fuente durante el primer TS;  $x_{r1}$  y  $x_{r2}$  las señales emitidas por el relay uno y el relay dos. Por otro lado,  $y_{SD}$ ,  $y_{SR1}$  y  $y_{SR2}$  son las señales de salida de los canales S-D, S-R1 y S-R2;  $y_{R1D}$  y  $y_{R2D}$  son las señales de salida de los canales R1-D y R2-D. Se definen  $h_{ij}$  como los coeficientes de canal en los que la transmisión se realiza desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ . Por último,  $n_i$  es el ruido aditivo Gaussiano de media nula y varianza  $\sigma_i^2$  en el receptor  $i$ .

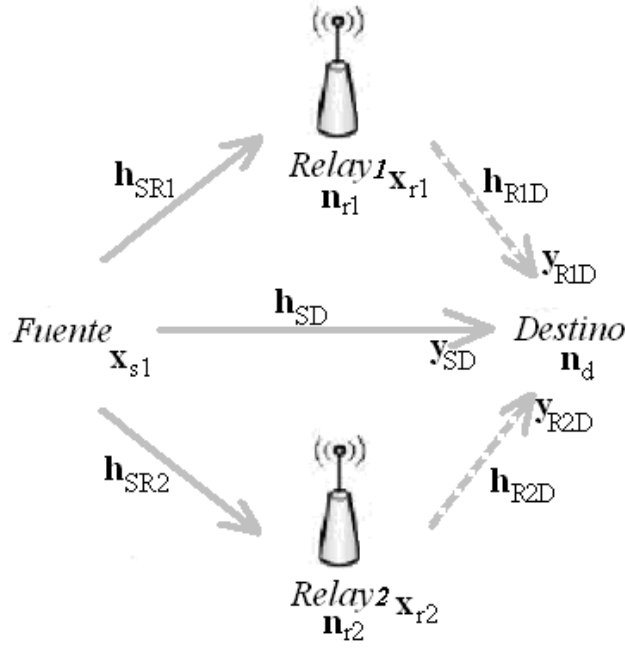


Figura 7.1: Escenario I'

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR1} = h_{SR1} \cdot x_{s1} + n_{r1} \quad (7.1)$$

$$y_{SR2} = h_{SR2} \cdot x_{s1} + n_{r2} \quad (7.2)$$

$$y_{SD} = h_{SD} \cdot x_{s1} + n_d \quad (7.3)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_D = y_{R1D} + y_{R2D} = h_{R1D} \cdot x_{r1} + h_{R2D} \cdot x_{r2} + n_{d2} \quad (7.4)$$

Al emplear AF, cada relay amplifica la señal recibida por la fuente:

$$x_{ri} = f_i \cdot y_{SRi} \rightarrow i = 1, 2 \quad (7.5)$$

Siendo  $f_i$  el factor de escalado obtenido a partir de las restricciones iniciales impuestas<sup>1</sup>:

$$P_{ri} = f_i^2 \left( |h_{SRi}|^2 \cdot P_s + \sigma_{ri}^2 \right) \Rightarrow f_i = \sqrt{\frac{P_{ri}}{|h_{SRi}|^2 \cdot P_s + \sigma_{ri}^2}} \quad (7.6)$$

---

1

$$E \{ |x_{s1}|^2 \} \leq P_s \quad E \{ |x_{ri}|^2 \} \leq P_{ri}$$

Tras sustituir el factor de escalado en la Ec. 7.4, la señal recibida en el destino,  $y$ , durante el segundo TS queda:

$$y_D = (h_{R1D} \cdot f_1 \cdot h_{SR1} + h_{R2D} \cdot f_2 \cdot h_{SR2}) \cdot x_{s1} + h_{R1D} \cdot f_1 \cdot n_{r1} + h_{R2D} \cdot f_2 \cdot n_{r2} + n_{d2} \quad (7.7)$$

De manera más compacta se pueden resumir las ecuaciones anteriores en modo matricial:

$$\bar{y} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \bar{n} \quad (7.8)$$

$$\begin{pmatrix} y_{SD} \\ y_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{SD} \\ h_{SR1} \cdot f_1 \cdot h_{R1D} + h_{SR2} \cdot f_2 \cdot h_{R2D} \end{pmatrix} x_{s1} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ f_1 \cdot h_{R1D} & f_2 \cdot h_{R2D} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{r1} \\ n_{r2} \\ n_{d1} \\ n_{d2} \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

Para el cálculo de la capacidad en este escenario se va hacer uso de la siguiente expresión[11]:

$$C = \log_2 \frac{|\bar{R}_y|}{|\bar{R}_n|} = \log_2 \left| \bar{I} + \left( \bar{B} \cdot \bar{R}_n \cdot \bar{B}^H \right)^{-1} \cdot P_s \cdot \bar{A} \cdot \bar{A}^H \right| \quad (7.10)$$

En este momento, resulta interesante analizar el valor de la capacidad teniendo en cuenta dos casos: uno en el que los coeficientes de canal  $h_{ij}$  sean complejos y otro en el que dichos coeficientes sean reales.

#### ■ Valores complejos

En este caso cuando se calcule el valor de una expresión del tipo  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^*$  donde  $\alpha$  y  $\beta$  son números complejos, el resultado es:  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 + 2\Re\{\alpha \cdot \beta^*\}$

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF1'_c} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \frac{E}{\sigma_d^2}}{1 + A + B} \right] \quad (7.11)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (7.12)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (7.13)$$

$$E = 2 \cdot P_s \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \Re\{h_{SR1} \cdot h_{R1D} \cdot h_{SR2}^* \cdot h_{R2D}^*\} \quad (7.14)$$

■ **Valores reales**

En este caso cuando se calcule el valor de una expresión del tipo  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^*$  donde  $\alpha$  y  $\beta$  son números reales, el resultado es:  $\alpha^2 + \beta^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \beta$

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF1'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2}{1 + A + B} \right] \quad (7.15)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (7.16)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (7.17)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos *time slots*. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_d^2} \quad \text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s \cdot |h_{SRi}|^2}{\sigma_{ri}^2} \quad \text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri} \cdot |h_{RiD}|^2}{\sigma_d^2} \quad (7.18)$$

### 7.1.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

Tal y como se hizo para los escenarios que utilizaban un único relay, en esta sección se analizan los valores de capacidad obtenidos en función de la potencia emitida por la fuente y los dos relays, así como los valores obtenidos en función de la posición de los dos relays y del valor del exponente de pérdidas en el trayecto. Este estudio se realiza teniendo en cuenta que se produce desvanecimiento de tipo Rayleigh dado que resulta un escenario más parecido al de la realidad. De este modo, los coeficientes de canal  $h_{ij}$  son modelados como variables aleatorias Gaussianas complejas, donde  $|h_{ij}|$  se modela como una distribución de tipo Rayleigh.

#### Capacidad y potencia

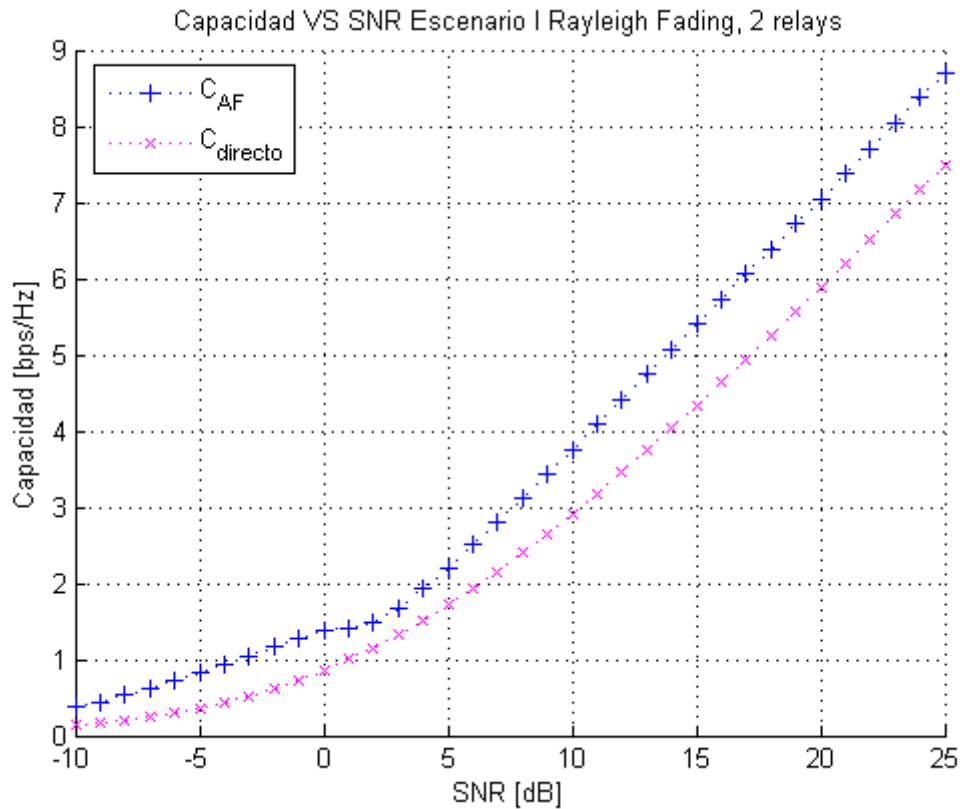


Figura 7.2: Capacidad VS Potencia Escenario I', con desvanecimiento

La Figura 7.2 muestra los valores de capacidad obtenidos en el sistema (ver Figura 7.1) cuando los dos relays están a distancia intermedia entre la fuente y el destino, encontrándose separados estos terminales a distancia unidad (normalizada). Los valores de la varianza de ruido

en cualquiera de los receptores es igual a la unidad. Por último, los valores de la potencia emitida por la fuente y ambos relays se van variando de manera conjunta.

Los valores de capacidad ofrecidos por el modo de funcionamiento AF superan a los ofrecidos por el sistema sin utilizar ningún relay, dentro del rango de potencias simulado. Conforme aumentan los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays, la diferencia de capacidad aumenta.

### Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

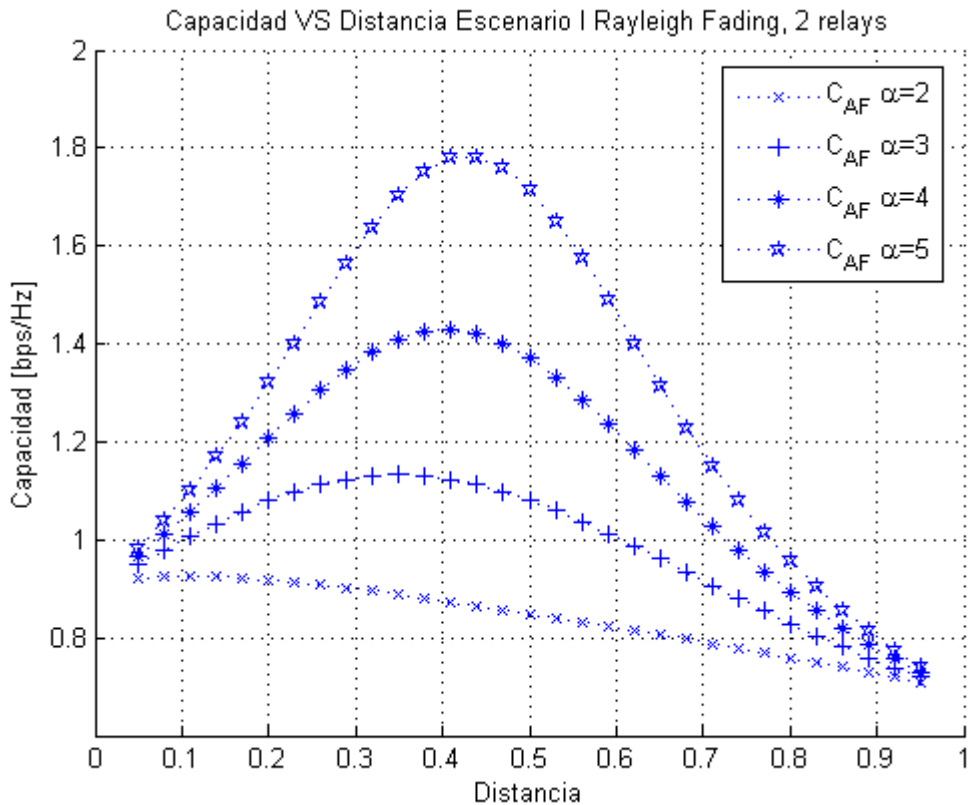


Figura 7.3: Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento

En este caso los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays son de 1[W] y los valores de la varianza de ruido en los receptores son iguales a la unidad. Se normaliza a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que ambos relays se ubiquen en cualquier posición intermedia, pero desplazándose a la par. Tal y como se vio en el caso de los escenarios anteriores, conforme aumenta el valor del exponente de pérdidas el valor de la capacidad disminuye debido

a que la separación es menor de la unidad ( $\text{SNR} = \frac{P}{(\sigma^2 * d^\alpha)}$ ). En el siguiente apartado se mostrará qué ocurre cuando la separación es mayor.

En la Figura 7.3 se puede apreciar que los valores máximos de capacidad se obtienen en posiciones de los relays intermedias entre la fuente y destino, y conforme se aleja de dichas ubicaciones los valores disminuyen. Además, dichos valores decrecen en mayor medida en las posiciones de los relays más cercanas al destino. Esto es consecuencia de que los términos  $\text{SNR}_{SRi}$  ejercen una mayor influencia que el resto en la Ec. 7.11.

### Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

En este apartado el único parámetro que cambia es la distancia entre fuente y destino, que pasa a valer 5 unidades normalizadas. En la Figura 7.4 se aprecia la existencia de un valor mínimo y dos máximos de capacidad. En el Apéndice D se analizan de manera teórica. En este caso se verifica cómo al aumentar el valor del exponente de pérdidas, el valor de la capacidad disminuye.

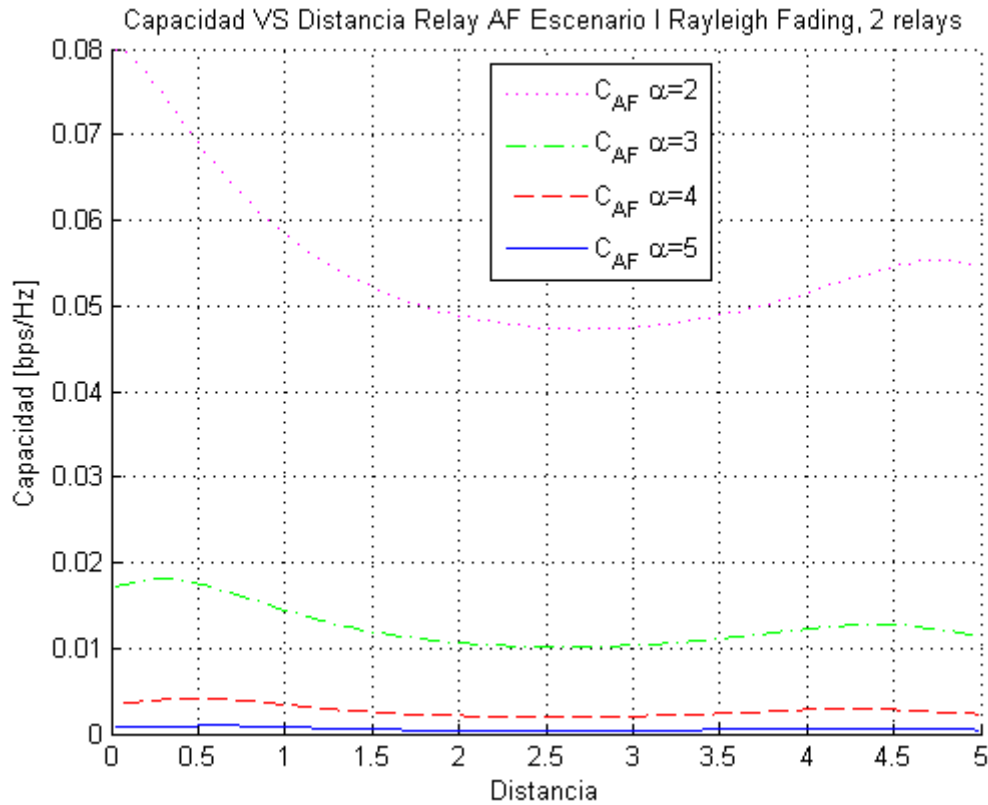


Figura 7.4: Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento

La Figura 7.5 pone de manifiesto la importancia de una correcta elección de parámetros para conseguir, al menos, alcanzar los valores de capacidad ofrecidos por un sistema que no utilice relays. En el caso en el que  $\alpha = 4$  se pueden ubicar los dos relays cerca de la fuente o del destino, ya que en ambos se consigue más capacidad que con la transmisión directa.



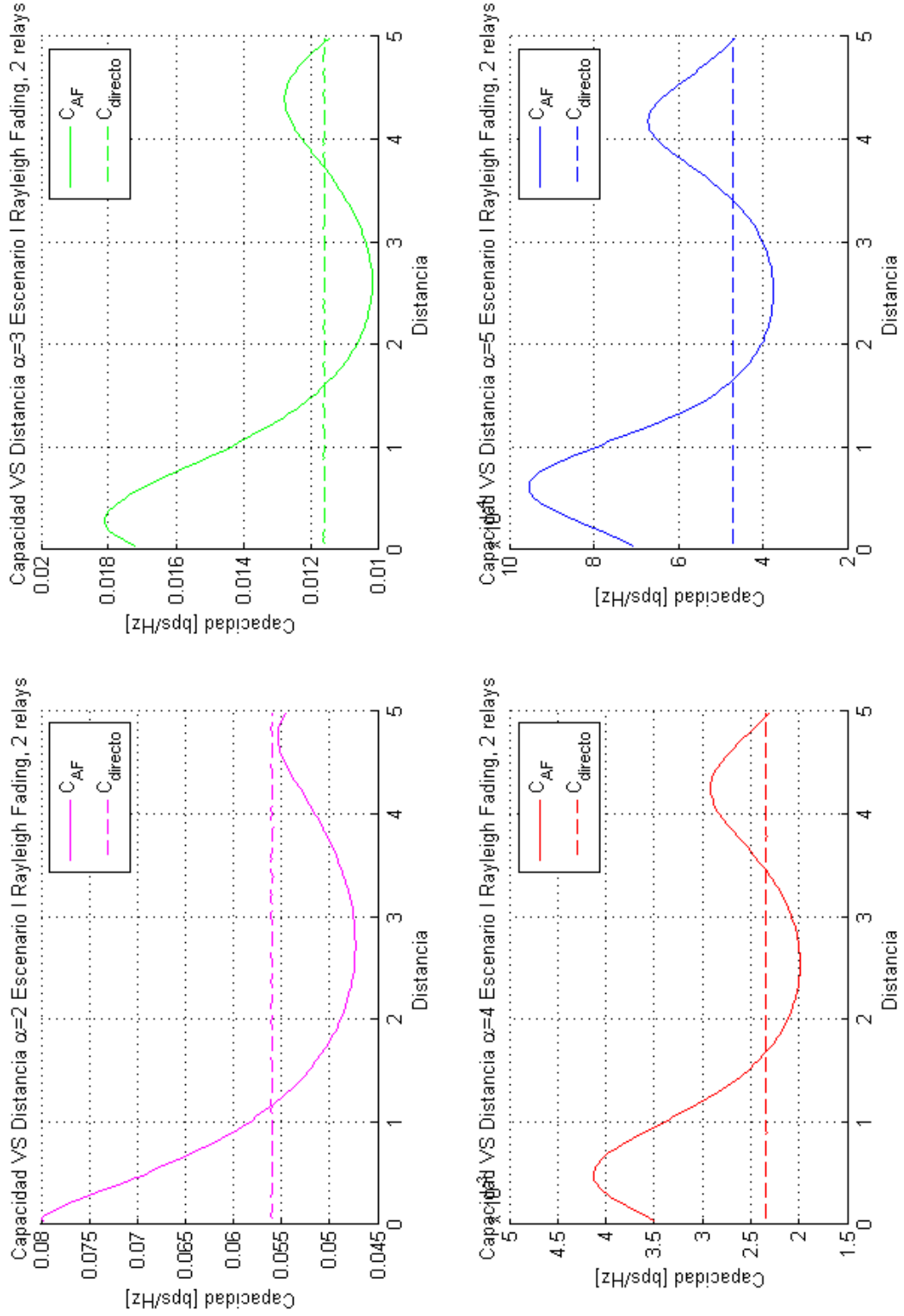


Figura 7.5: Capacidad VS Distancia Escenario I', exponente de pérdidas, desvanecimiento

Por último, se muestra (Figura 7.6) la comparativa entre el Escenario I' y la transmisión sin relay para potencias de 1[W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

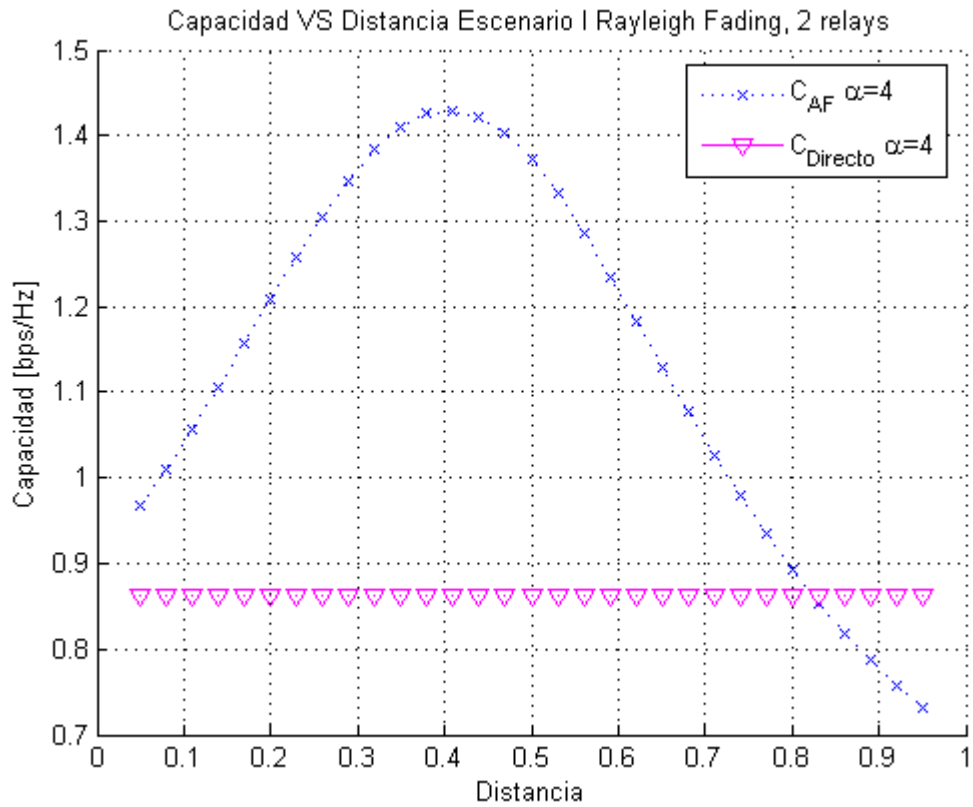


Figura 7.6: Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento

## 7.2. ESCENARIO II'

## 7.2.1. AF

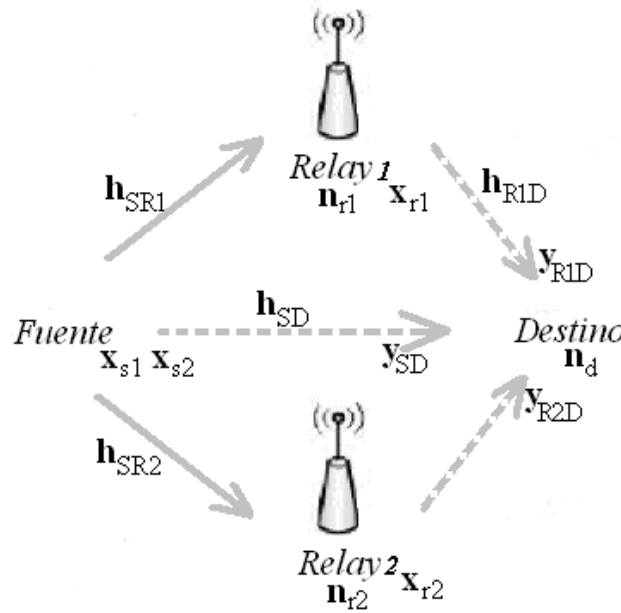


Figura 7.7: Escenario II'

En el escenario de la Figura 7.7, al igual que en el escenario anterior,  $x_{s1}$ ,  $x_{s2}$  denotan la señal transmitida por la fuente durante el primer TS y el segundo TS;  $x_{r1}$  y  $x_{r2}$  las señales emitidas por el relay uno y el relay dos. Por otro lado,  $y_{SD}$ ,  $y_{SR1}$  y  $y_{SR2}$  son las señales de salida de los canales S-D, S-R1 y S-R2;  $y_{R1D}$  y  $y_{R2D}$  son las señales de salida de los canales R1-D y R2-D. Se definen  $h_{ij}$  como los coeficientes de canal en los que la transmisión se realiza desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ , son modelados como variables aleatorias independientes Gaussianas complejas, donde  $|h_{ij}|$  se corresponde con una distribución de tipo Rayleigh. Por último,  $n_i$  es el ruido aditivo Gaussiano en el receptor  $i$ .

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR1} = h_{SR1} \cdot x_{s1} + n_{r1} \quad (7.19)$$

$$y_{SR2} = h_{SR2} \cdot x_{s1} + n_{r2} \quad (7.20)$$

- 2° Time Slot:

$$y_D = y_{SD} + y_{R1D} + y_{R2D} = h_{SD} \cdot x_{s2} + n_d + h_{R1D} \cdot x_{r1} + h_{R2D} \cdot x_{r2} \quad (7.21)$$

Al emplear AF, cada relay amplifica la señal recibida por la fuente:

$$x_{ri} = f_i \cdot y_{SRi} \rightarrow i = 1, 2 \quad (7.22)$$

Siendo  $f_i$  el factor de escalado obtenido a partir de las restricciones iniciales impuestas<sup>2</sup>:

$$P_{ri} = f_i^2 \left( |h_{SRi}|^2 \cdot P_s + \sigma_{ri}^2 \right) \Rightarrow f_i = \sqrt{\frac{P_{ri}}{|h_{SRi}|^2 \cdot P_s + \sigma_{ri}^2}} \quad (7.23)$$

Tras sustituir el factor de escalado en la Ec. 7.21, la señal recibida en el destino,  $y$ , durante el segundo TS queda:

$$y_D = h_{SD} \cdot x_{s2} + (h_{R1D} \cdot f_1 \cdot h_{SR1} + h_{R2D} \cdot f_2 \cdot h_{SR2}) \cdot x_{s1} + h_{R1D} \cdot f_1 \cdot n_{r1} + h_{R2D} \cdot f_2 \cdot n_{r2} + n_d \quad (7.24)$$

De manera más compacta se pueden resumir las ecuaciones anteriores en modo matricial:

$$\bar{y} = \bar{\bar{A}} \cdot \bar{x} + \bar{\bar{B}} \cdot \bar{n} \quad (7.25)$$

$$y = y_D = \begin{pmatrix} h_{SR1} \cdot f_1 \cdot h_{R1D} + h_{SR2} \cdot f_2 \cdot h_{R2D} & h_{SD} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \cdot h_{R1D} & f_2 \cdot h_{R2D} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{r1} \\ n_{r2} \\ n_d \end{pmatrix} \quad (7.26)$$

Para el cálculo de la capacidad en este escenario se va hacer uso de la siguiente expresión[11]:

$$C = \log_2 \frac{|\bar{\bar{R}}_y|}{|\bar{\bar{R}}_n|} = \log_2 \left| \bar{\bar{I}} + \left( \bar{\bar{B}} \cdot \bar{\bar{R}}_n \cdot \bar{\bar{B}}^H \right)^{-1} \cdot P_s \cdot \bar{\bar{A}} \cdot \bar{\bar{A}}^H \right| \quad (7.27)$$

Al igual que en el Escenario I' se tienen en cuenta dos posibles casos: uno en el que los coeficientes de canal  $h_{ij}$  sean complejos y otro en el que dichos coeficientes sean reales.

$$E \{ |x_{si}|^2 \} \leq P_s \quad i = 1, 2 \quad E \{ |x_{ri}|^2 \} \leq P_{ri}$$

■ **Valores complejos**

Donde  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^* = |\alpha|^2 + |\beta|^2 + 2\Re\{\alpha \cdot \beta^*\}$ , siendo  $\alpha$  y  $\beta$  números complejos.

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF2'_c} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \frac{E}{\sigma_d^2} + \text{SNR}_{SD}}{1 + A + B} \right] \quad (7.28)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (7.29)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (7.30)$$

$$E = 2 \cdot P_s \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \Re\{h_{SR1} \cdot h_{R1D} \cdot h_{SR2}^* \cdot h_{R2D}^*\} \quad (7.31)$$

■ **Valores reales**

Donde  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^* = \alpha^2 + \beta^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \beta$  siendo  $\alpha$  y  $\beta$  números reales. Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF2'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2 + \text{SNR}_{SD}}{1 + A + B} \right] \quad (7.32)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (7.33)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (7.34)$$

En ambos casos, el factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_d^2} \quad \text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s \cdot |h_{SRi}|^2}{\sigma_{ri}^2} \quad \text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri} \cdot |h_{RiD}|^2}{\sigma_d^2} \quad (7.35)$$

### 7.2.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

#### Capacidad y potencia

La Figura 7.8 muestra los valores de capacidad obtenidos en el sistema (ver Figura 7.7) cuando los dos relays están a distancia intermedia entre la fuente y el destino, encontrándose separados estos terminales a distancia unidad (normalizada). Los valores de la varianza de ruido en cualquiera de los receptores es igual a la unidad. Por último, los valores de la potencia emitida por la fuente y ambos relays se van variando de manera conjunta.

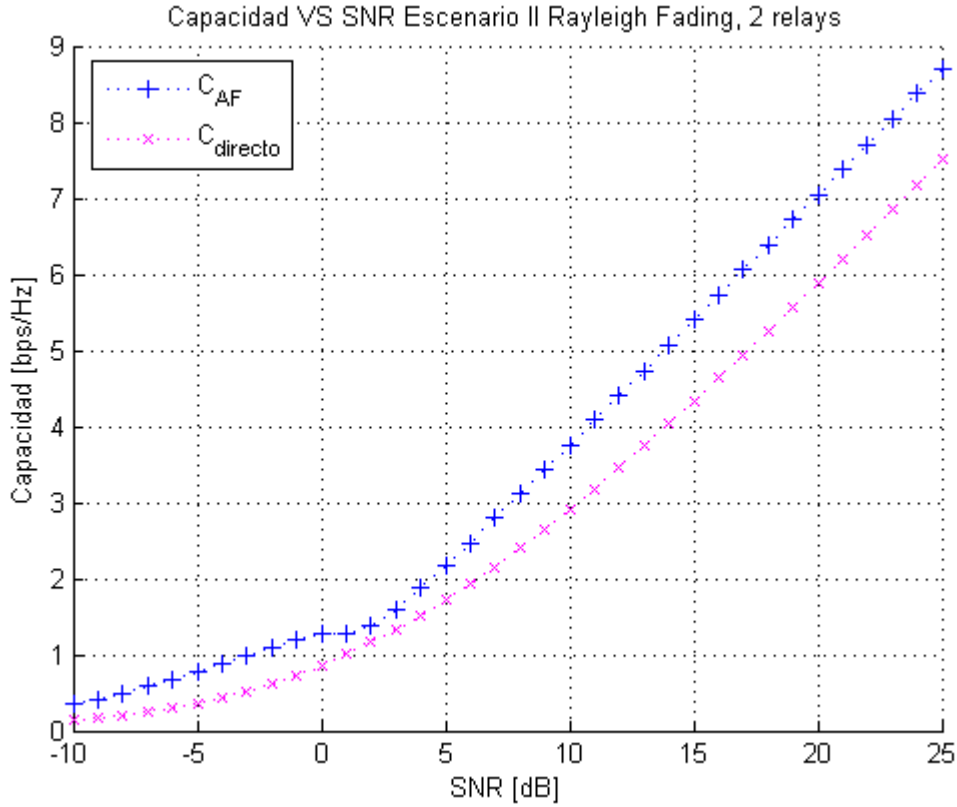


Figura 7.8: Capacidad VS Potencia Escenario II', con desvanecimiento

El resultado obtenido es prácticamente el mismo del Escenario I', excepto para potencias alrededor de los 0 [dBW] ya que el Escenario II' ofrece capacidades en torno a una décima inferiores. Este hecho quiere decir que los términos  $\frac{SNR_{SD}}{1+A+B}$  y  $SNR_{SD}$  son del mismo orden de magnitud, con lo que la transmisión desde la fuente hacia el destino en el primer TS o en el segundo TS no resulta determinante en rangos de potencias alejados de los 0 [dBW].

### Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

En este caso los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays valen  $1[W]$  y los valores de la varianza de ruido en los receptores son iguales a la unidad. Se normaliza a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que ambos relays se ubiquen en cualquier posición intermedia, pero desplazándose a la par.

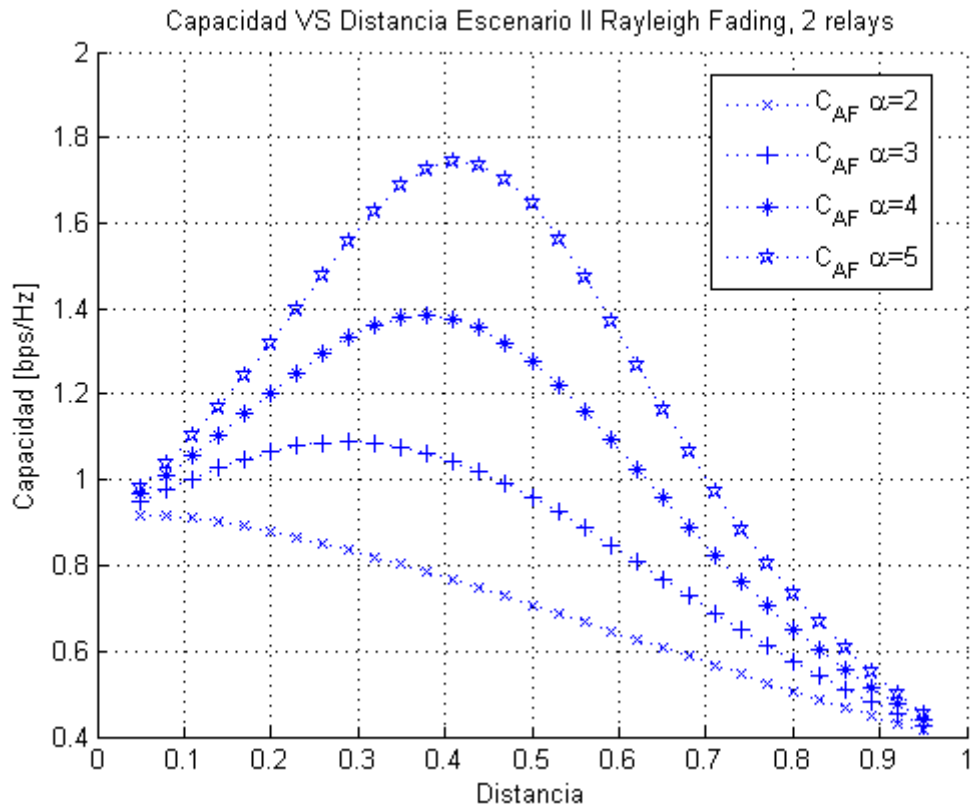


Figura 7.9: Capacidad VS Distancia Escenario II', con desvanecimiento

Al igual que ocurría en el escenario anterior, en la Figura 7.9 se observa que los valores máximos de capacidad se obtienen en posiciones de los relays intermedias entre la fuente y destino, y conforme se aleja de dichas ubicaciones los valores disminuyen. Además, dichos valores decrecen en mayor medida en las posiciones de los relays más cercanas al destino. Dado que la potencia emitida (0dBW) por la fuente y los relays se encuentra en el margen de potencias donde la capacidad del escenario anterior resulta ligeramente superior, al comparar la Figura 7.9 con la Figura 7.3, los valores de capacidad de la primera son ligeramente superiores.

### Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

En este apartado el único parámetro que cambia es la distancia entre fuente y destino, que pasa a valer 5 unidades normalizadas. En la Figura 7.10 se observa cómo la capacidad empieza siendo máxima y conforme la distancia entre fuente y relay se hace mayor, la capacidad disminuye.

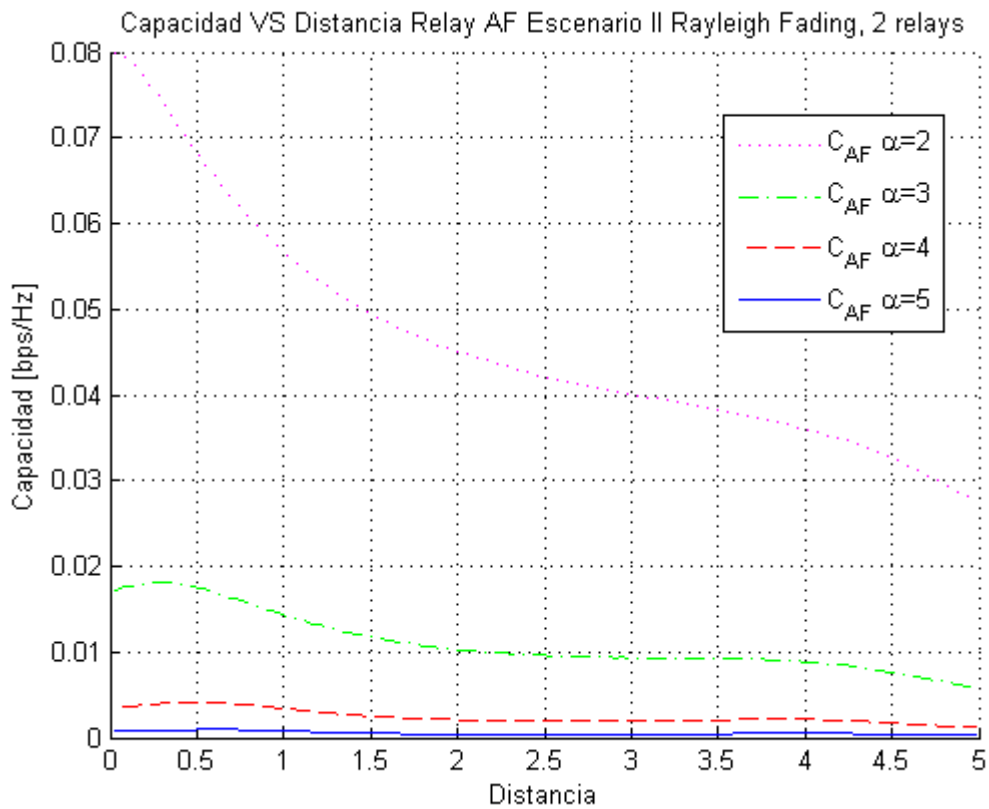


Figura 7.10: Capacidad VS Distancia Escenario II', con desvanecimiento

La siguiente Figura 7.11 muestra los valores de capacidad en función de la distancia según sea el valor del exponente de pérdidas. En el caso en el que  $\alpha = 4$  resulta conveniente ubicar los dos relays cerca de la fuente con el fin de obtener más capacidad que con la transmisión directa.



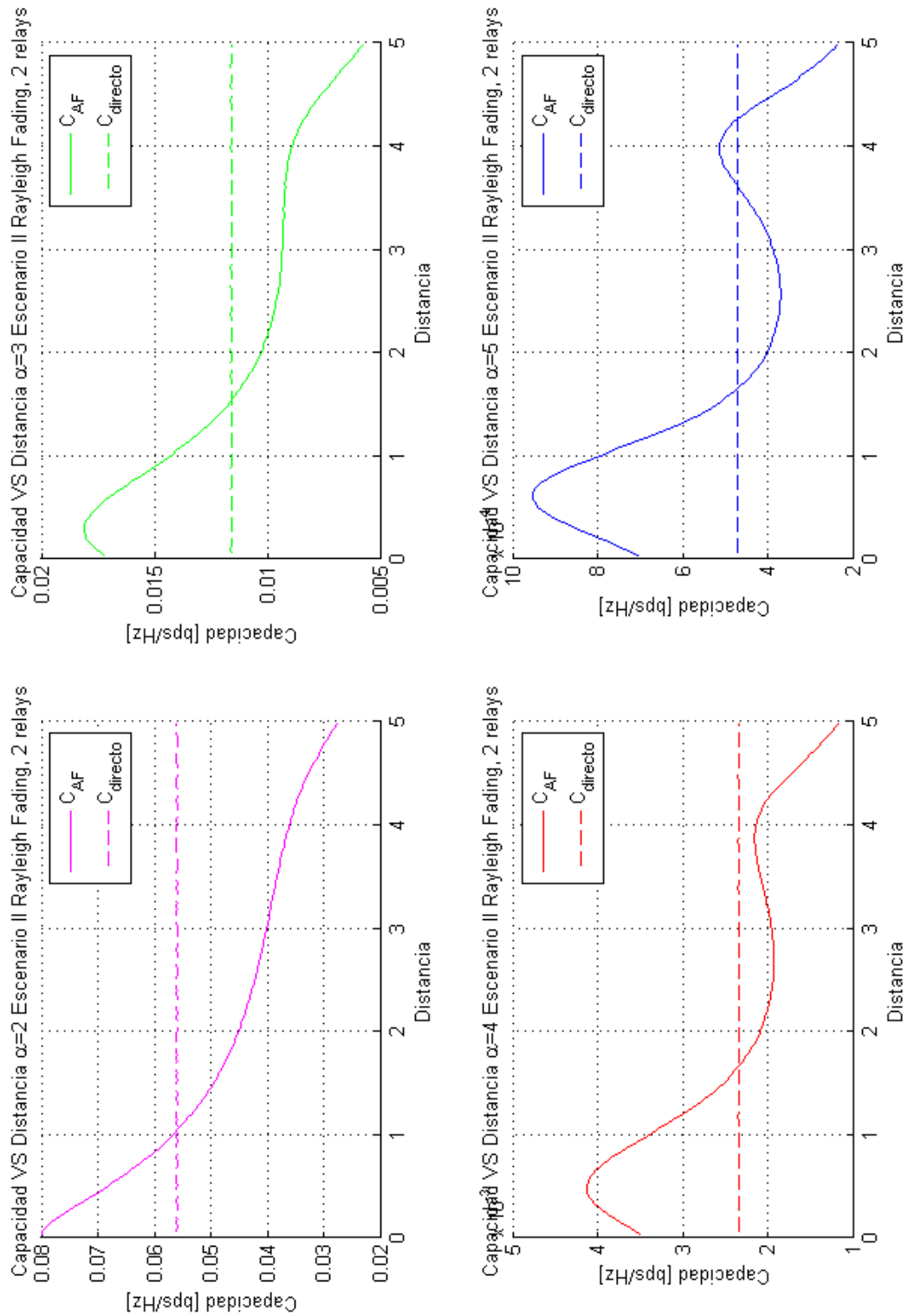


Figura 7.11: Capacidad VS Distancia Escenario II', exponente de pérdidas, desvanecimiento

Por último, se muestra (Figura 7.12) la comparativa entre el Escenario II' y la transmisión sin relay para potencias de 1 [W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

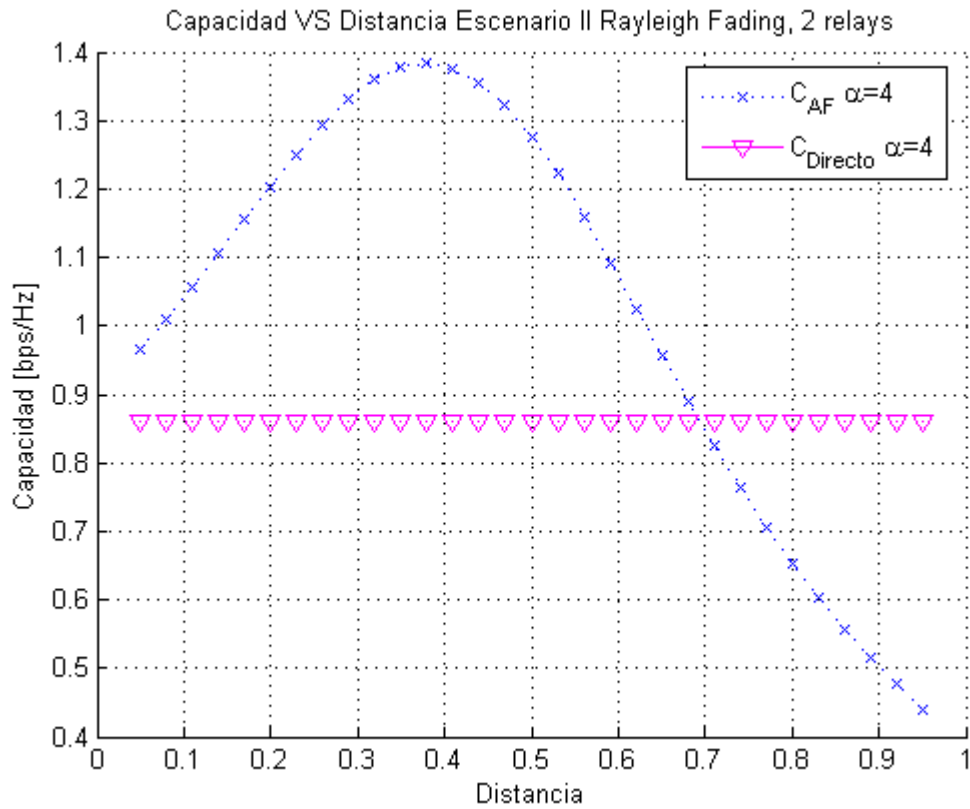


Figura 7.12: Capacidad VS Distancia Escenario II', con desvanecimiento

## 7.3. ESCENARIO III'

## 7.3.1. AF

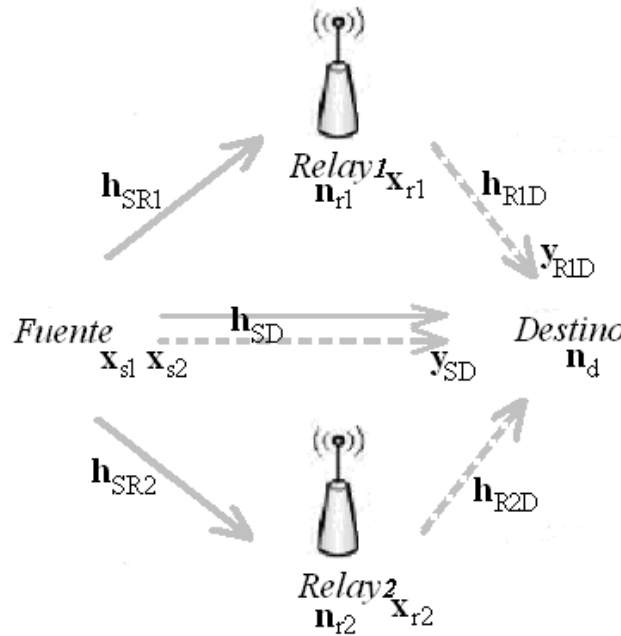


Figura 7.13: Escenario III'

En el escenario de la Figura 7.13, al igual que en el escenario anterior,  $x_{s1}$ ,  $x_{s2}$  denotan la señal transmitida por la fuente durante el primer TS y el segundo TS;  $x_{r1}$  y  $x_{r2}$  las señales emitidas por el relay uno y el relay dos. Por otro lado,  $y_{SD}$ ,  $y_{SR1}$  y  $y_{SR2}$  son las señales de salida de los canales S-D, S-R1 y S-R2;  $y_{R1D}$  y  $y_{R2D}$  son las señales de salida de los canales R1-D y R2-D. Se definen  $h_{ij}$  como los coeficientes de canal en los que la transmisión se realiza desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ , son modelados como variables aleatorias independientes Gaussianas complejas, donde  $|h_{ij}|$  se corresponde con una distribución de tipo Rayleigh. Por último,  $n_i$  es el ruido aditivo Gaussiano en el receptor  $i$ .

■ 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR1} = h_{SR1} \cdot x_{s1} + n_{r1} \quad (7.36)$$

$$y_{SR2} = h_{SR2} \cdot x_{s1} + n_{r2} \quad (7.37)$$

$$y_{SD} = h_{SD} \cdot x_{s1} + n_{d1} \quad (7.38)$$

- 2° Time Slot:

$$y_D = y_{SD} + y_{R1D} + y_{R2D} = h_{SD} \cdot x_{s2} + n_{d2} + h_{R1D} \cdot x_{r1} + h_{R2D} \cdot x_{r2} \quad (7.39)$$

Al emplear AF, cada relay amplifica la señal recibida por la fuente:

$$x_{ri} = f_i \cdot y_{SRi} \rightarrow i = 1, 2 \quad (7.40)$$

Siendo  $f_i$  el factor de escalado obtenido a partir de las restricciones iniciales impuestas<sup>3</sup>:

$$P_{ri} = f_i^2 \left( |h_{SRi}|^2 \cdot P_s + \sigma_{ri}^2 \right) \Rightarrow f_i = \sqrt{\frac{P_{ri}}{|h_{SRi}|^2 \cdot P_s + \sigma_{ri}^2}} \quad (7.41)$$

Tras sustituir el factor de escalado en la Ec. 7.39, la señal recibida en el destino,  $y_D$ , durante el segundo TS queda:

$$y_D = h_{SD}x_{s2} + (h_{R1D}f_1h_{SR1} + h_{R2D}f_2 \cdot h_{SR2})x_{s1} + h_{R1D}f_1n_{r1} + h_{R2D}f_2n_{r2} + n_{d2} \quad (7.42)$$

De manera más compacta se pueden resumir las ecuaciones anteriores en modo matricial:

$$\bar{y} = \bar{\bar{A}} \cdot \bar{x} + \bar{\bar{B}} \cdot \bar{n} \quad (7.43)$$

$$\begin{pmatrix} y_{SD} \\ y_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{SD} & 0 \\ h_{SR1}f_1h_{R1D} + h_{SR2}f_2h_{R2D} & h_{SD} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ f_1h_{R1D} & f_2h_{R2D} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{r1} \\ n_{r2} \\ n_{d1} \\ n_{d2} \end{pmatrix} \quad (7.44)$$

Para el cálculo de la capacidad en este escenario se va hacer uso de la siguiente expresión [11]:

$$C = \log_2 \frac{|\bar{\bar{R}}_y|}{|\bar{\bar{R}}_n|} = \log_2 \left| \bar{\bar{I}} + \left( \bar{\bar{B}} \cdot \bar{\bar{R}}_n \cdot \bar{\bar{B}}^H \right)^{-1} \cdot P_s \cdot \bar{\bar{A}} \cdot \bar{\bar{A}}^H \right| \quad (7.45)$$

Al igual que en los escenarios anteriores se tienen en cuenta dos posibles casos: uno en el que los coeficientes de canal  $h_{ij}$  sean complejos y otro en el que dichos coeficientes sean reales.

$$E \{ |x_{si}|^2 \} \leq P_s \quad i = 1, 2 \quad E \{ |x_{ri}|^2 \} \leq P_{ri}$$

■ **Valores complejos**

Donde  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^* = |\alpha|^2 + |\beta|^2 + 2\Re\{\alpha \cdot \beta^*\}$ , siendo  $\alpha$  y  $\beta$  números complejos.

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF3'_c} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \frac{E}{\sigma_d^2} + \text{SNR}_{SD} [2 + A + B + \text{SNR}_{SD}]}{1 + A + B} \right] \quad (7.46)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (7.47)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (7.48)$$

$$E = 2 \cdot P_s \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \Re\{h_{SR1} \cdot h_{R1D} \cdot h_{SR2}^* \cdot h_{R2D}^*\} \quad (7.49)$$

■ **Valores reales**

Donde  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^* = \alpha^2 + \beta^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \beta$  siendo  $\alpha$  y  $\beta$  números reales. Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF3'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2 + \text{SNR}_{SD} [2 + A + B + \text{SNR}_{SD}]}{1 + A + B} \right] \quad (7.50)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (7.51)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (7.52)$$

En ambos casos, el factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_{d1}^2} \quad \text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s \cdot |h_{SRi}|^2}{\sigma_{ri}^2} \quad \text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri} \cdot |h_{RiD}|^2}{\sigma_{d2}^2} \quad (7.53)$$

### 7.3.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

#### Capacidad y potencia

La Figura 7.14 muestra los valores de capacidad obtenidos en el sistema (ver Figura 7.7) cuando los dos relays están a distancia intermedia entre la fuente y el destino, encontrándose separados estos terminales distancia unidad (normalizada). Los valores de la varianza de ruido en cualquiera de los receptores es igual a la unidad. Por último, los valores de la potencia emitida por la fuente y ambos relays se van variando de manera conjunta.

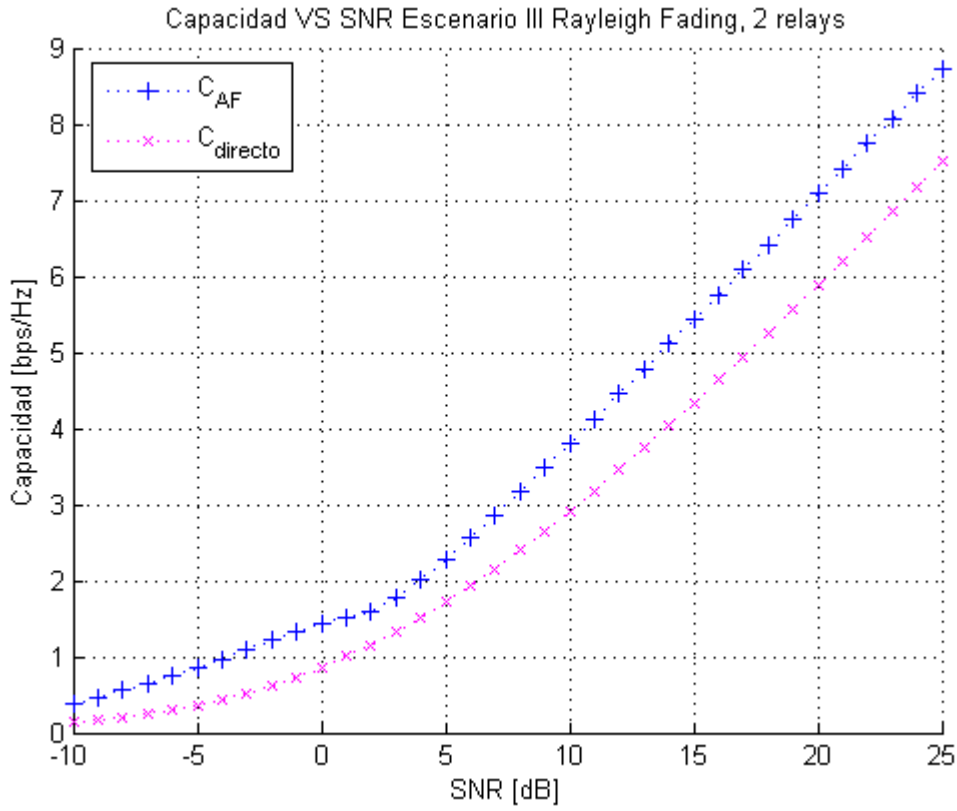


Figura 7.14: Capacidad VS Potencia Escenario III', con desvanecimiento

El resultado obtenido presenta un comportamiento similar al de los dos escenarios anteriores con la salvedad de que en éste, los valores de capacidad son entorno a una décima superiores al del Escenario I' (y, por tanto, superiores a los del Escenario II'). Si de la Ec. 7.46 se descompone el término  $\frac{SNR_{SD}[2+A+B+SNR_{SD}]}{1+A+B}$  se obtiene:  $SNR_{SD} + \frac{SNR_{SD}}{1+A+B} + \frac{SNR_{SD}^2}{1+A+B}$  que aparecen en el Escenario I' y el Escenario II'; mas una cierta cantidad. Por ello, es lógico que los valores de la capacidad sean algo superiores a los ofrecidos por dichos escenarios.

### Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

En este caso los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays son de  $1[W]$  y los valores de la varianza de ruido en los receptores son iguales a la unidad. Se normaliza a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que ambos relays se ubiquen en cualquier posición intermedia, pero desplazándose a la par.

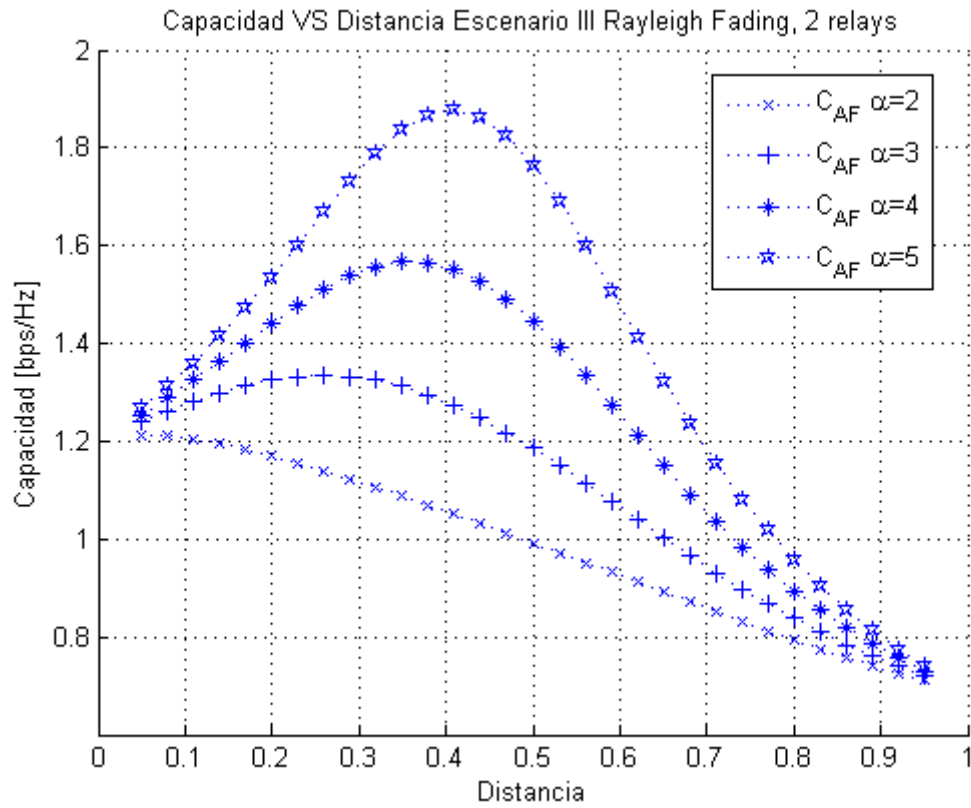


Figura 7.15: Capacidad VS Distancia Escenario III', con desvanecimiento

La Figura 7.15 muestra que los valores máximos de capacidad se obtienen en posiciones de los relays intermedias entre la fuente y destino, y conforme se aleja de dichas ubicaciones los valores disminuyen. Además, dichos valores decrecen en mayor medida en las posiciones de los relays más cercanas al destino. Este comportamiento es idéntico al de los dos escenarios anteriores, sin embargo, los valores de capacidad son ligeramente superiores, tal y como ocurría en la simulación previa.

## Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

En este apartado el único parámetro que cambia es la distancia entre fuente y destino, que pasa a valer 5 unidades normalizadas. En la Figura 7.16 se observa cómo la capacidad empieza siendo máxima y conforme la distancia entre fuente y relay se hace mayor, la capacidad disminuye.

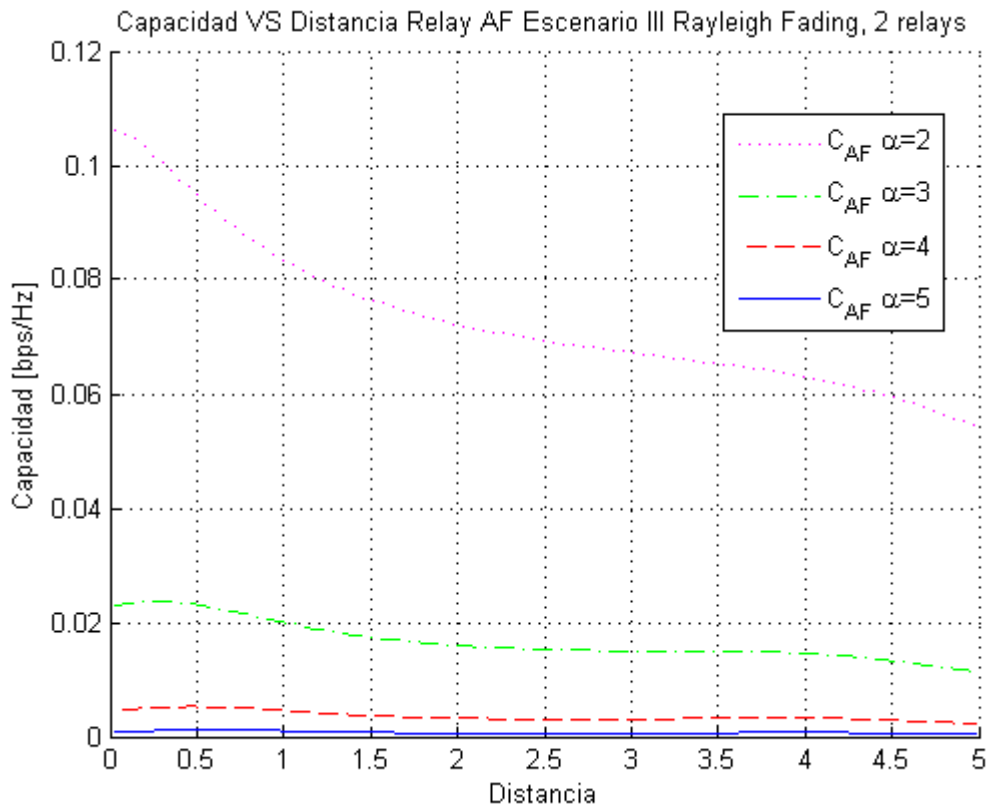


Figura 7.16: Capacidad VS Distancia Escenario III', con desvanecimiento

En la Figura 7.17 se muestran los valores de capacidad en función de la distancia según sea el valor del exponente de pérdidas. Se puede apreciar claramente cómo, sea cual sea el valor del exponente de pérdidas, la capacidad alcanzada en cualquier posición de los relays es superior al de la transmisión directa.



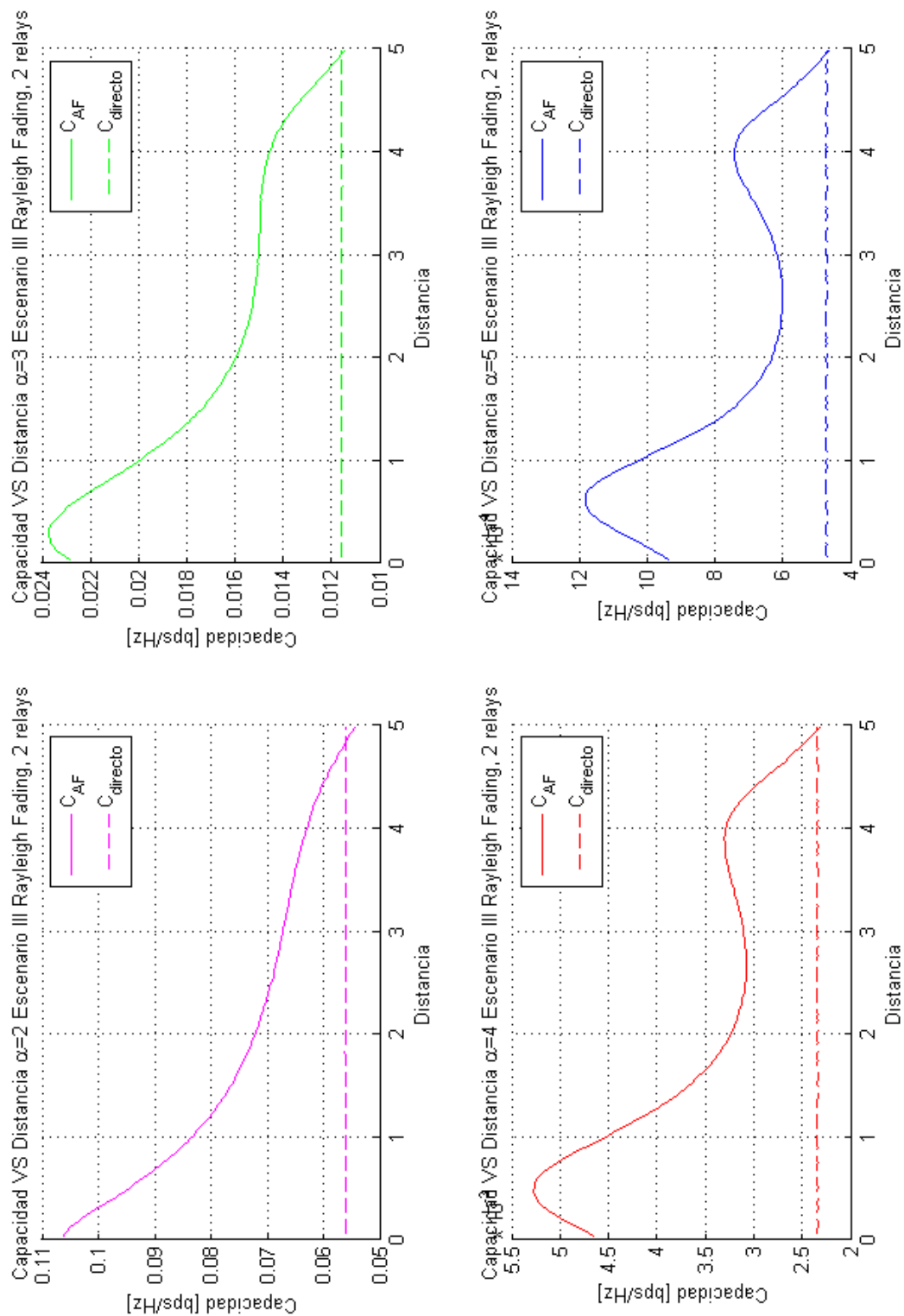


Figura 7.17: Capacidad VS Distancia Escenario II', exponente de pérdidas, desvanecimiento

Por último, se muestra (Figura 7.18) la comparativa entre el Escenario III' y la transmisión sin relay para potencias de 1 [W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

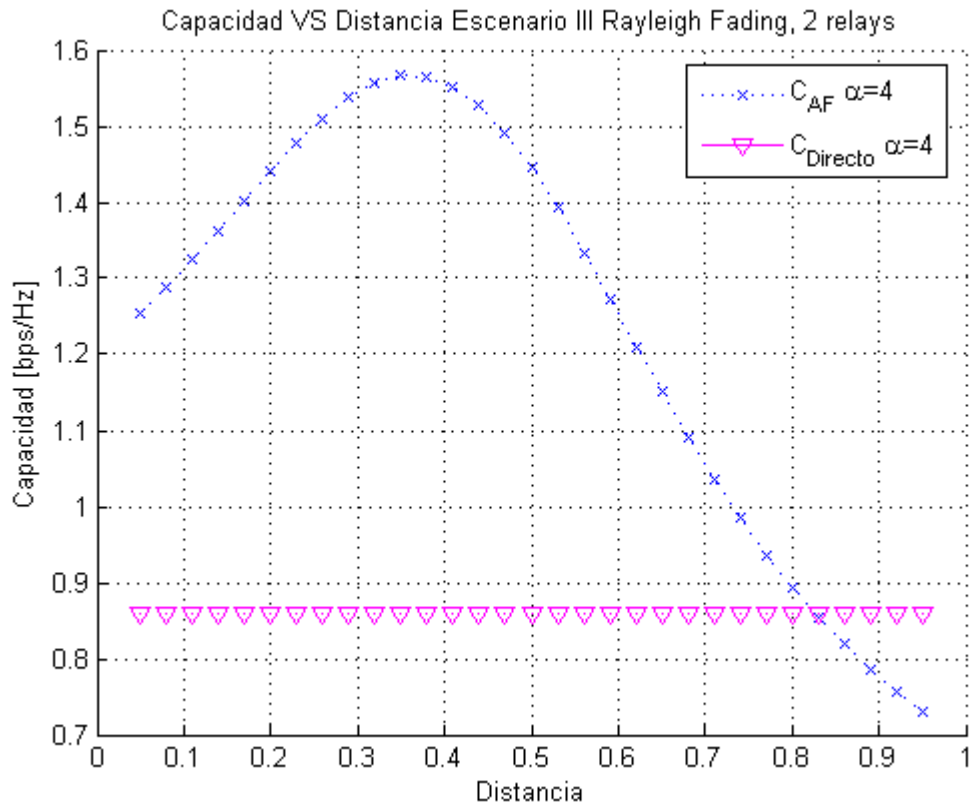


Figura 7.18: Capacidad VS Distancia Escenario III', con desvanecimiento

## 7.4. ESCENARIO IV'

## 7.4.1. AF

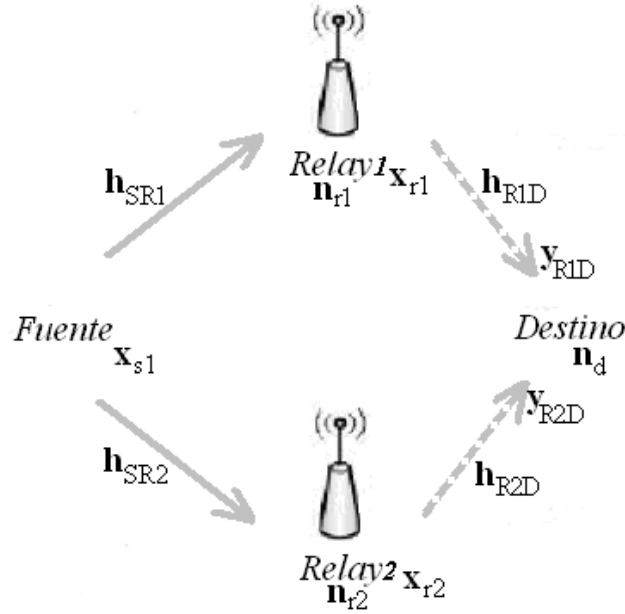


Figura 7.19: Escenario IV'

En el escenario de la Figura 7.19, al igual que en el escenario anterior,  $x_{s1}$  denota la señal transmitida por la fuente durante el primer TS;  $x_{r1}$  y  $x_{r2}$  las señales emitidas por el relay uno y el relay dos. Por otro lado,  $y_{SR1}$  y  $y_{SR2}$  son las señales de salida de los canales S-R1 y S-R2;  $y_{R1D}$  y  $y_{R2D}$  son las señales de salida de los canales R1-D y R2-D. Se definen  $h_{ij}$  como los coeficientes de canal en los que la transmisión se realiza desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ , son modelados como variables aleatorias independientes Gaussianas complejas, donde  $|h_{ij}|$  se corresponde con una distribución de tipo Rayleigh. Por último,  $n_i$  es el ruido aditivo Gaussiano en el receptor  $i$ .

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR1} = h_{SR1} \cdot x_{s1} + n_{r1} \quad (7.54)$$

$$y_{SR2} = h_{SR2} \cdot x_{s1} + n_{r2} \quad (7.55)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_D = y_{R1D} + y_{R2D} = h_{R1D} \cdot x_{r1} + h_{R2D} \cdot x_{r2} + n_d \quad (7.56)$$

Al emplear AF, cada relay amplifica la señal recibida por la fuente:

$$x_{ri} = f_i \cdot y_{SRi} \rightarrow i = 1, 2 \quad (7.57)$$

Siendo  $f_i$  el factor de escalado obtenido a partir de las restricciones iniciales impuestas<sup>4</sup>:

$$P_{ri} = f_i^2 \left( |h_{SRi}|^2 \cdot P_s + \sigma_{ri}^2 \right) \Rightarrow f_i = \sqrt{\frac{P_{ri}}{|h_{SRi}|^2 \cdot P_s + \sigma_{ri}^2}} \quad (7.58)$$

Tras sustituir el factor de escalado en la Ec. 7.56, la señal recibida en el destino,  $y_D$ , durante el segundo TS queda:

$$y_D = (h_{R1D}f_1h_{SR1} + h_{R2D}f_2 \cdot h_{SR2}) x_{s1} + h_{R1D}f_1n_{r1} + h_{R2D}f_2n_{r2} + n_d \quad (7.59)$$

De manera más compacta se pueden resumir las ecuaciones anteriores en modo matricial:

$$\bar{y} = \bar{\bar{A}} \cdot \bar{x} + \bar{\bar{B}} \cdot \bar{n} \quad (7.60)$$

$$y_D = (h_{SR1}f_1h_{R1D} + h_{SR2}f_2h_{R2D}) \cdot x_{s1} + \begin{pmatrix} f_1h_{R1D} & f_2h_{R2D} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{r1} \\ n_{r2} \\ n_d \end{pmatrix} \quad (7.61)$$

Para el cálculo de la capacidad en este escenario se va hacer uso de la siguiente expresión[11]:

$$C = \log_2 \frac{|\bar{\bar{R}}_y|}{|\bar{\bar{R}}_n|} = \log_2 \left| \bar{\bar{I}} + \left( \bar{\bar{B}} \cdot \bar{\bar{R}}_n \cdot \bar{\bar{B}}^H \right)^{-1} \cdot P_s \cdot \bar{\bar{A}} \cdot \bar{\bar{A}}^H \right| \quad (7.62)$$

Al igual que en los escenarios anteriores se tienen en cuenta dos posibles casos: uno en el que los coeficientes de canal  $h_{ij}$  sean complejos y otro en el que dichos coeficientes sean reales.

#### ■ Valores complejos

Donde  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^* = |\alpha|^2 + |\beta|^2 + 2\Re\{\alpha \cdot \beta^*\}$ , siendo  $\alpha$  y  $\beta$  números complejos.

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF4'_c} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \frac{E}{\sigma_d^2}}{1 + A + B} \right] \quad (7.63)$$

$$E\{|x_{s1}|^2\} \leq P_s \quad E\{|x_{ri}|^2\} \leq P_{ri}$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (7.64)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (7.65)$$

$$E = 2 \cdot P_s \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \Re \{h_{SR1} \cdot h_{R1D} \cdot h_{SR2}^* \cdot h_{R2D}^*\} \quad (7.66)$$

■ **Valores reales**

Donde  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^* = \alpha^2 + \beta^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \beta$  siendo  $\alpha$  y  $\beta$  números reales. Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF4'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2}{1 + A + B} \right] \quad (7.67)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (7.68)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (7.69)$$

En ambos casos, el factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_d^2} \quad \text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s \cdot |h_{SRi}|^2}{\sigma_{ri}^2} \quad \text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri} \cdot |h_{RiD}|^2}{\sigma_d^2} \quad (7.70)$$

## 7.4.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

## Capacidad y potencia

La Figura 7.20 muestra los valores de capacidad obtenidos en el sistema (ver Figura 7.19) cuando los dos relays están a distancia intermedia entre la fuente y el destino, encontrándose separados estos terminales a distancia unidad (normalizada). Los valores de la varianza de ruido en cualquiera de los receptores es igual a la unidad. Por último, los valores de la potencia emitida por la fuente y ambos relays se van variando de manera conjunta.

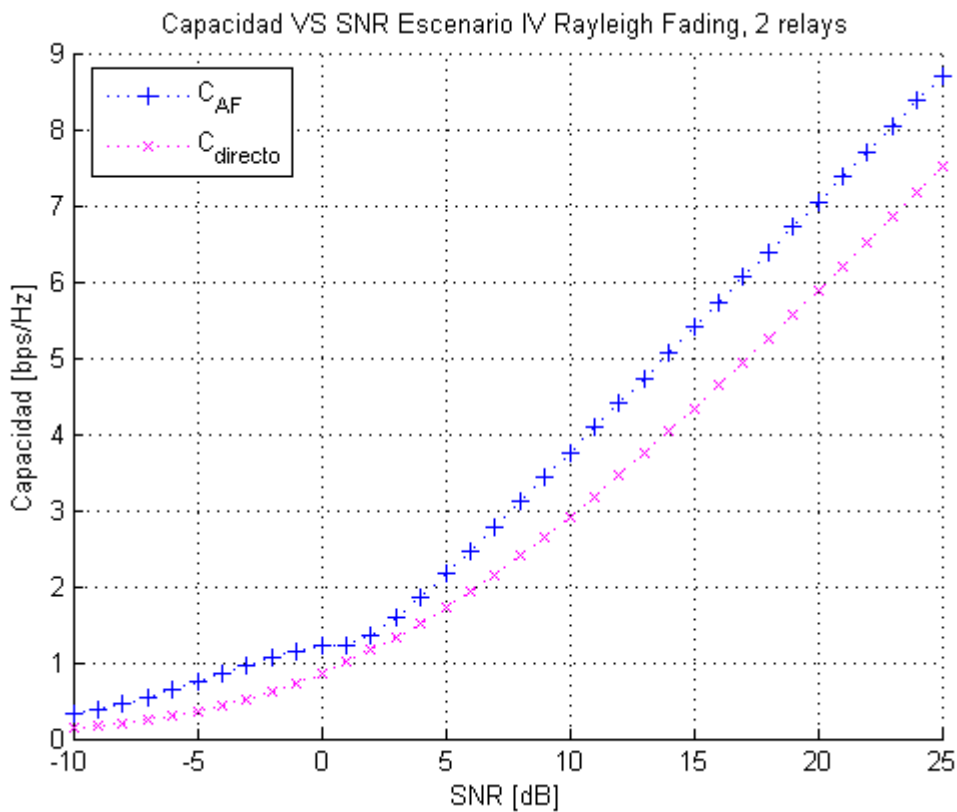


Figura 7.20: Capacidad VS Potencia Escenario IV', con desvanecimiento

El resultado obtenido presenta un comportamiento similar al de los dos escenarios previos. Dado que en este escenario no hay comunicación directa entre fuente y destino, el término  $SNR_{SD}$  no aparece en la Ec. 7.63, con lo que los valores de la capacidad en el entorno de los 0dBW son inferiores a los ofrecidos por los escenarios anteriores.

### Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

En este caso los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays valen  $1[W]$  y los valores de la varianza de ruido en los receptores son iguales a la unidad. Se normaliza a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que ambos relays se ubiquen en cualquier posición intermedia, pero desplazándose a la par.

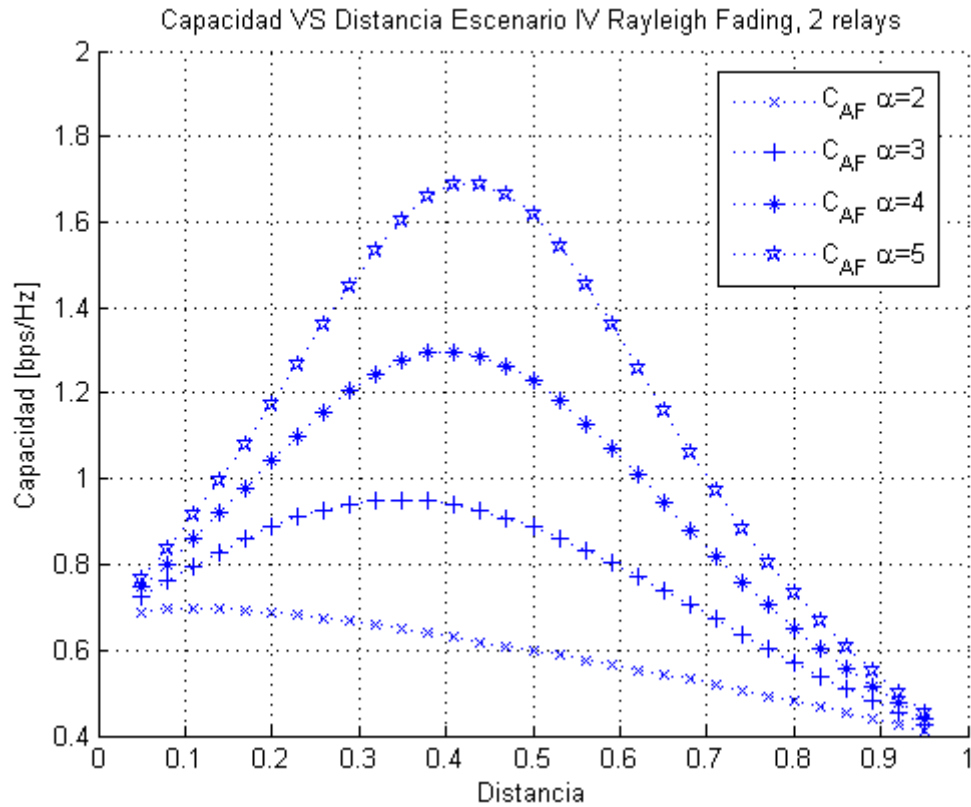


Figura 7.21: Capacidad VS Distancia Escenario IV', con desvanecimiento

La Figura 7.21 muestra un comportamiento similar al de los escenarios anteriores ofreciendo valores inferiores de capacidad, ya que no hay comunicación directa entre fuente y destino.

### Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

En este apartado el único parámetro que cambia es la distancia entre fuente y destino, que pasa a valer 5 unidades normalizadas. En la Figura 7.22 se aprecia la existencia de un valor mínimo y dos máximos de capacidad, de manera similar a como ocurría en el Escenario I'.

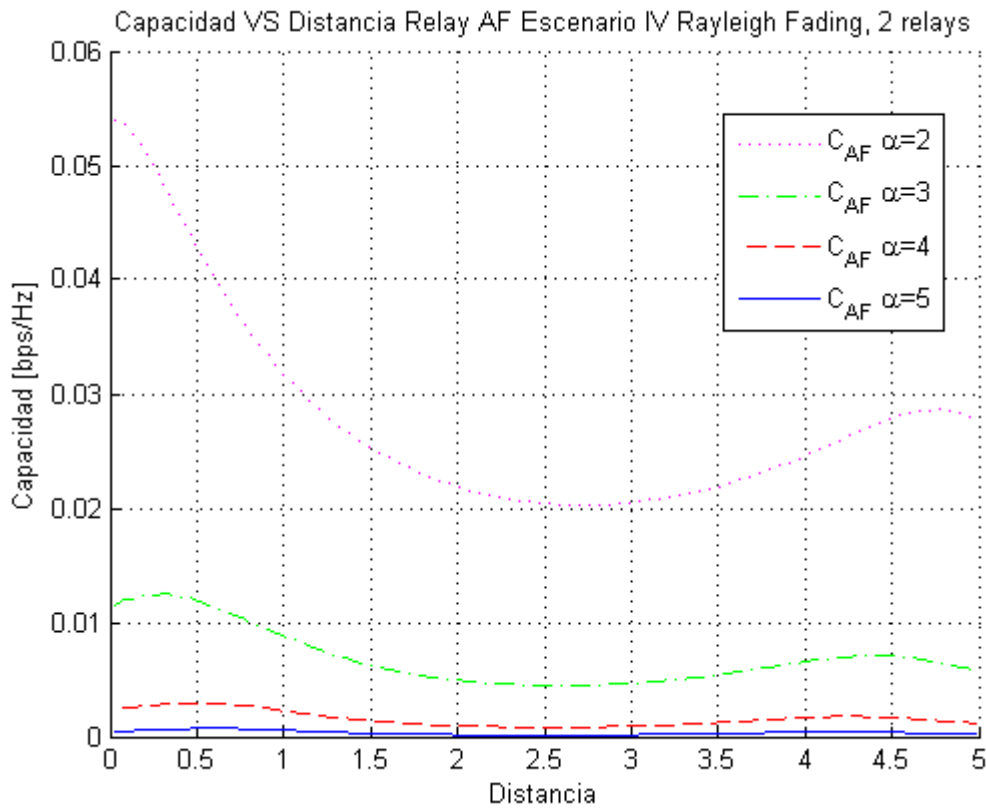


Figura 7.22: Capacidad VS Distancia Escenario IV', con desvanecimiento

En la siguiente Figura 7.23 se muestran los valores de capacidad en función de la distancia según sea el valor del exponente de pérdidas. Es relevante destacar que para  $\alpha = 2$  no hay ninguna posición para los relays en la que la capacidad llegue ni siquiera a igualar a la del sistema de transmisión directa; y para  $\alpha = 4$  sólo se superan en zonas cercanas a la fuente.



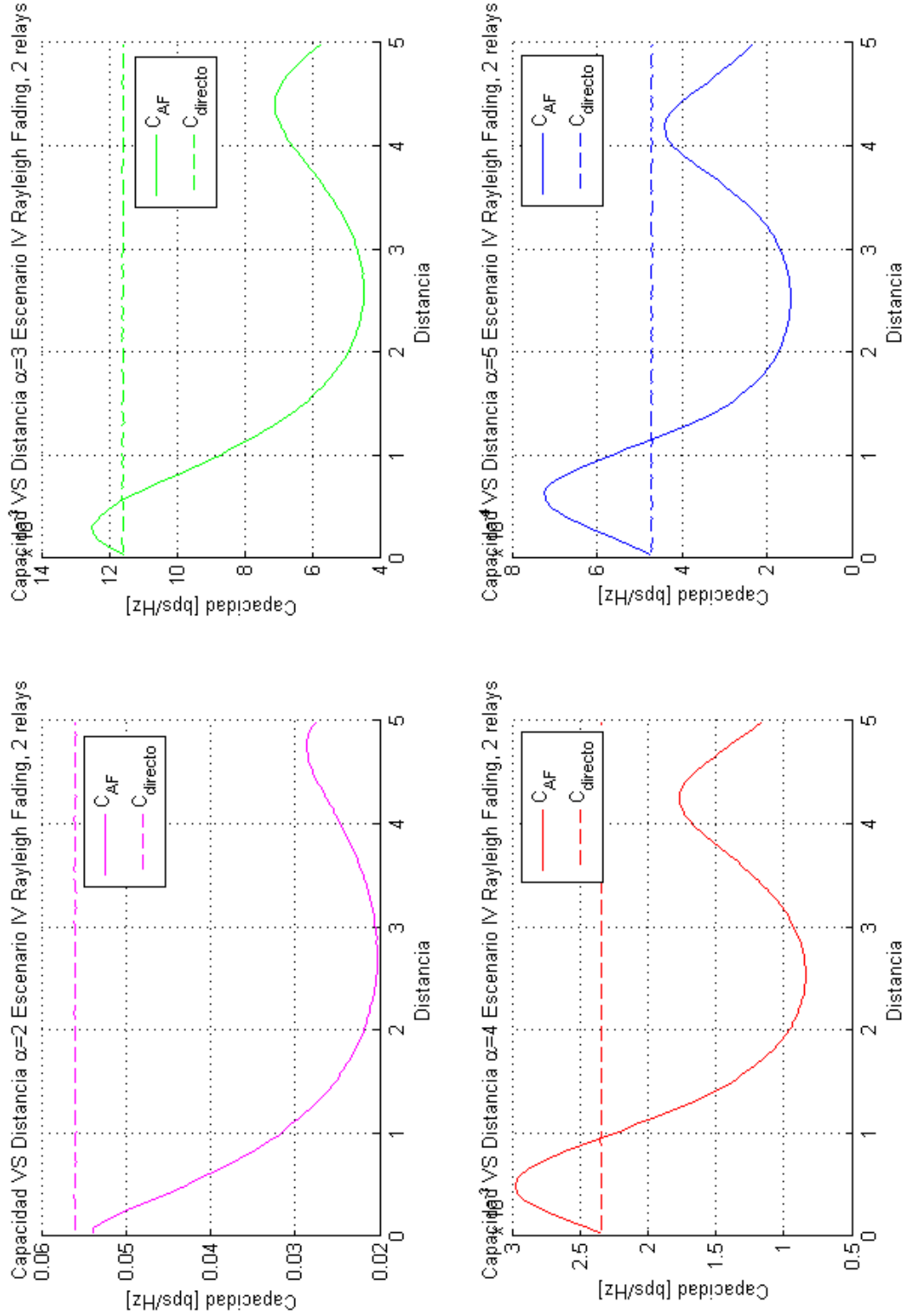


Figura 7.23: Capacidad VS Distancia Escenario IV', exponente de pérdidas, desvanecimiento

Por último, se muestra (Figura 7.24) la comparativa entre el Escenario IV' y la transmisión sin relay para potencias de 1[W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

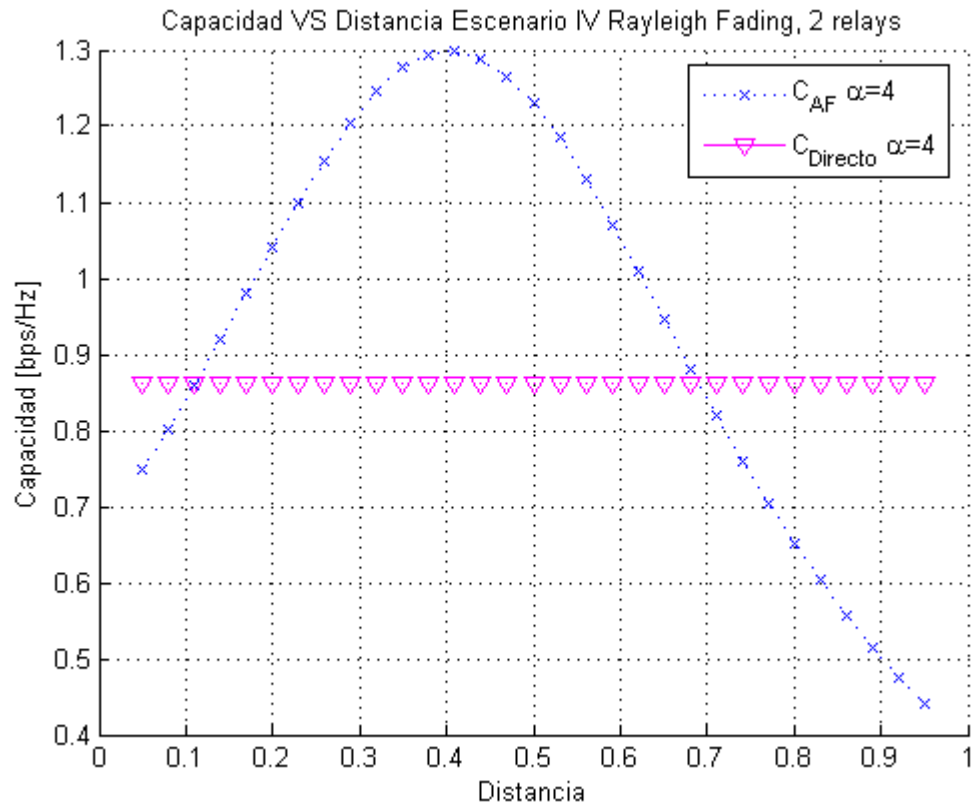


Figura 7.24: Capacidad VS Distancia Escenario IV', con desvanecimiento

## 2 RELAYS. RECEPTOR SUMA SEÑALES EN POTENCIA

### 8.1. ESCENARIO I”

En este capítulo se estudiarán los escenarios en los que las señales que llegan al receptor son sumadas en potencia, suponiendo que éste es capaz de separar dichas señales. Al igual que en el capítulo anterior, se realiza un análisis teórico y práctico.

#### 8.1.1. AF

En este modelo *half-duplex* (ver Figura 8.1),  $x_{s1}$  denota la señal transmitida por la fuente durante el primer TS;  $x_{r1}$  y  $x_{r2}$  las señales emitidas por el relay uno y el relay dos. Por otro lado,  $y_{SD}$ ,  $y_{SR1}$  y  $y_{SR2}$  son las señales de salida de los canales S-D, S-R1 y S-R2;  $y_{R1D}$  y  $y_{R2D}$  son las señales de salida de los canales R1-D y R2-D. Se definen  $h_{ij}$  como los coeficientes de canal en los que la transmisión se realiza desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ . Por último,  $n_i$  es el ruido aditivo Gaussiano de media nula y varianza  $\sigma_i^2$  en el receptor  $i$ .

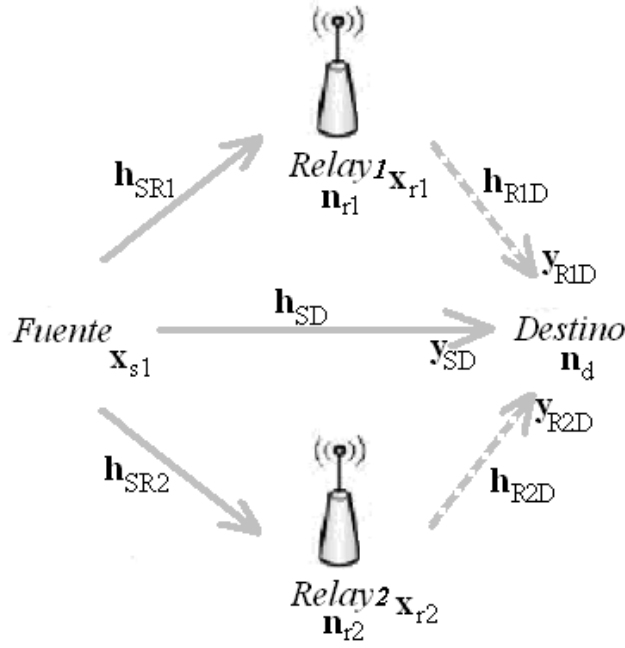


Figura 8.1: Escenario I'

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR1} = h_{SR1} \cdot x_{s1} + n_{r1} \quad (8.1)$$

$$y_{SR2} = h_{SR2} \cdot x_{s1} + n_{r2} \quad (8.2)$$

$$y_{SD} = h_{SD} \cdot x_{s1} + n_{d1} \quad (8.3)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_D = y_{R1D} + y_{R2D} = h_{R1D} \cdot x_{r1} + h_{R2D} \cdot x_{r2} + n_{d2} \quad (8.4)$$

Procediendo de la misma manera que en el Escenario I' se obtiene:

$$\begin{pmatrix} y_{SD} \\ y_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{SD} \\ h_{SR1} \cdot f_1 \cdot h_{R1D} + h_{SR2} \cdot f_2 \cdot h_{R2D} \end{pmatrix} x_{s1} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ f_1 \cdot h_{R1D} & f_2 \cdot h_{R2D} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{r1} \\ n_{r2} \\ n_{d1} \\ n_{d2} \end{pmatrix} \quad (8.5)$$

En este caso cuando se calcule el valor de la expresión del tipo  $(\alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta)^*$  donde  $\alpha$  y  $\beta$  son números complejos, el resultado es:  $|\alpha|^2 + |\beta|^2$ . Finalmente, tras realizar los cálculos

oportunos, se obtiene:

$$C_{AF1''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2}}{1 + A + B} \right] \quad (8.6)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (8.7)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (8.8)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_{d1}^2} \quad \text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s \cdot |h_{SRi}|^2}{\sigma_{ri}^2} \quad \text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri} \cdot |h_{RiD}|^2}{\sigma_{d2}^2} \quad (8.9)$$

### 8.1.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

Tal y como se hizo para los escenarios que utilizaban un único relay, en esta sección se analizan los valores de capacidad obtenidos en función de la potencia emitida por la fuente y los dos relays, así como los valores obtenidos en función de la posición de los dos relays y del valor del exponente de pérdidas en el trayecto. Este estudio se realiza teniendo en cuenta que se produce desvanecimiento de tipo Rayleigh dado que resulta un escenario más parecido al de la realidad. Los coeficientes de canal son modelados como variables aleatorias independientes Gaussianas complejas, donde  $|h_{ij}|$  se corresponde con una distribución de tipo Rayleigh

#### Capacidad y potencia

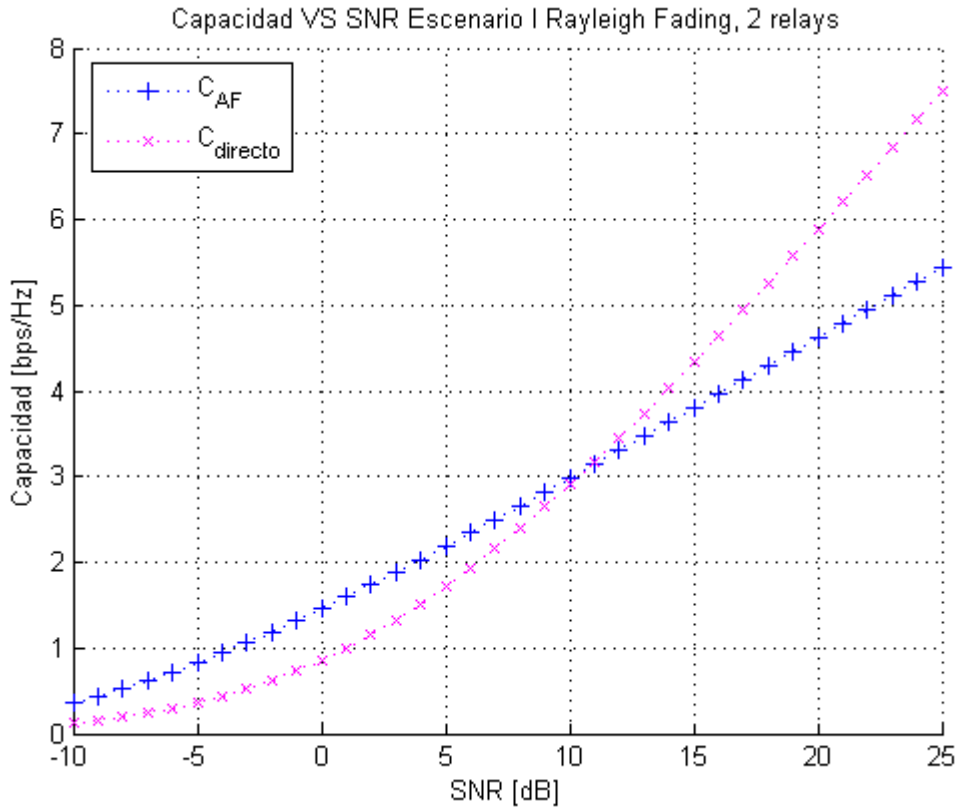


Figura 8.2: Capacidad VS Potencia Escenario I", con desvanecimiento

La Figura 8.2 muestra los valores de capacidad obtenidos en el sistema (ver Figura 8.1) cuando los dos relays están a distancia intermedia entre la fuente y el destino, encontrándose separados estos terminales distancia unidad (normalizada). Los valores de la varianza de ruido

en cualquiera de los receptores es igual a la unidad. Por último, los valores de la potencia emitida por la fuente y ambos relays se van variando de manera conjunta.

Conforme el nivel de potencia utilizado en la transmisión aumenta, la capacidad del escenario también aumenta, distinguiéndose dos regiones:

$$SNR < 11dB \rightarrow C_{AF} > C_{directo}$$

$$SNR > 11dB \rightarrow C_{directo} > C_{AF}$$

Un comportamiento similar se observaba en el Escenario I, aunque los valores de capacidad de éste resultaban ligeramente superiores, entorno a la décima.

### Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

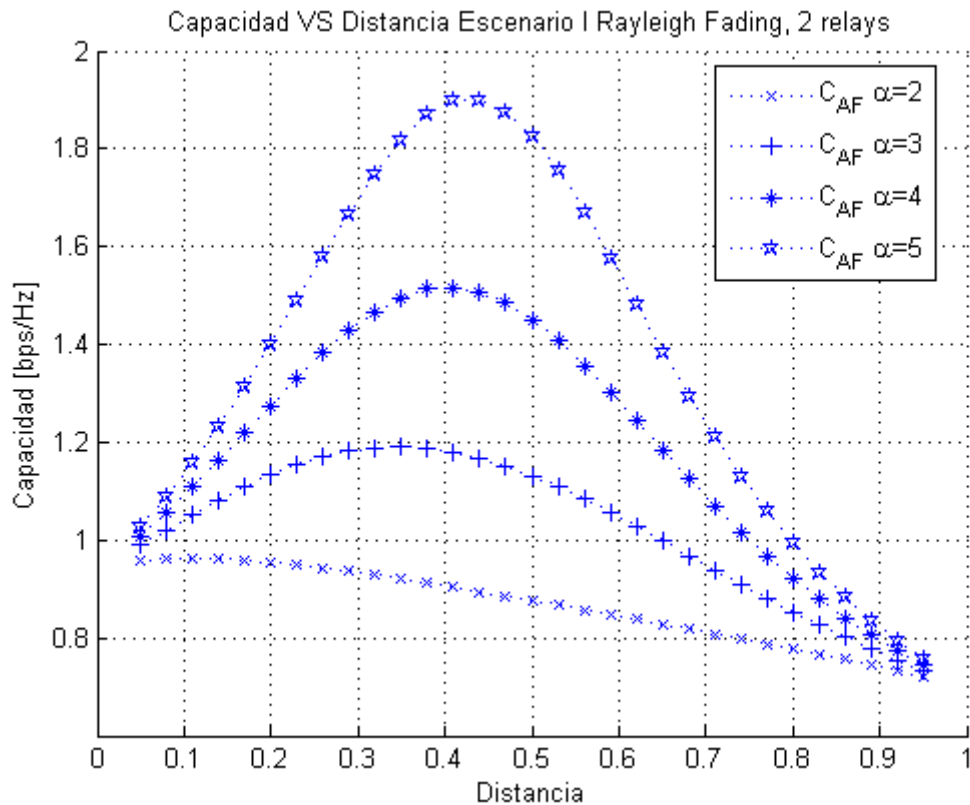


Figura 8.3: Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento

En este caso los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays son  $1[W]$  y los valores de la varianza de ruido en los receptores son iguales a la unidad. Se normaliza a la unidad la

distancia entre fuente y destino, permitiendo que ambos relays se ubiquen en cualquier posición intermedia, pero desplazándose a la par. Tal y como se vio en el caso de los escenarios anteriores, conforme aumenta el valor del exponente de pérdidas el valor de la capacidad disminuye debido a que la separación es menor de la unidad ( $\text{SNR} = \frac{P}{(\sigma^2 * d^\alpha)}$ ). En el siguiente apartado se mostrará qué ocurre cuando la separación es mayor.

En la Figura 8.3 se puede apreciar que los valores máximos de capacidad se obtienen en posiciones de los relays intermedias entre la fuente y destino, y conforme se aleja de dichas ubicaciones los valores disminuyen. Además, dichos valores decrecen en mayor medida en las posiciones de los relays más cercanas al destino. Esto es consecuencia de que los términos  $\text{SNR}_{SRi}$  ejercen una mayor influencia que el resto en la Ec. 8.6 ya que en este caso, al estar situados los dos relays en la misma posición, las SNR entre cualquiera de los dos relays y otro nodo de comunicación (fuente y/o destino) son equivalentes, con lo que los parámetros A y B de la Ec. 8.6 son iguales.

### **Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad**

En este apartado el único parámetro que cambia es la distancia entre fuente y destino, que pasa a valer 5 unidades normalizadas. En la Figura 8.4 se aprecia la existencia de un valor mínimo y dos máximos de capacidad. En el Apéndice E se analizan de manera teórica. En este caso se verifica cómo al aumentar el valor del exponente de pérdidas, el valor de la capacidad disminuye.



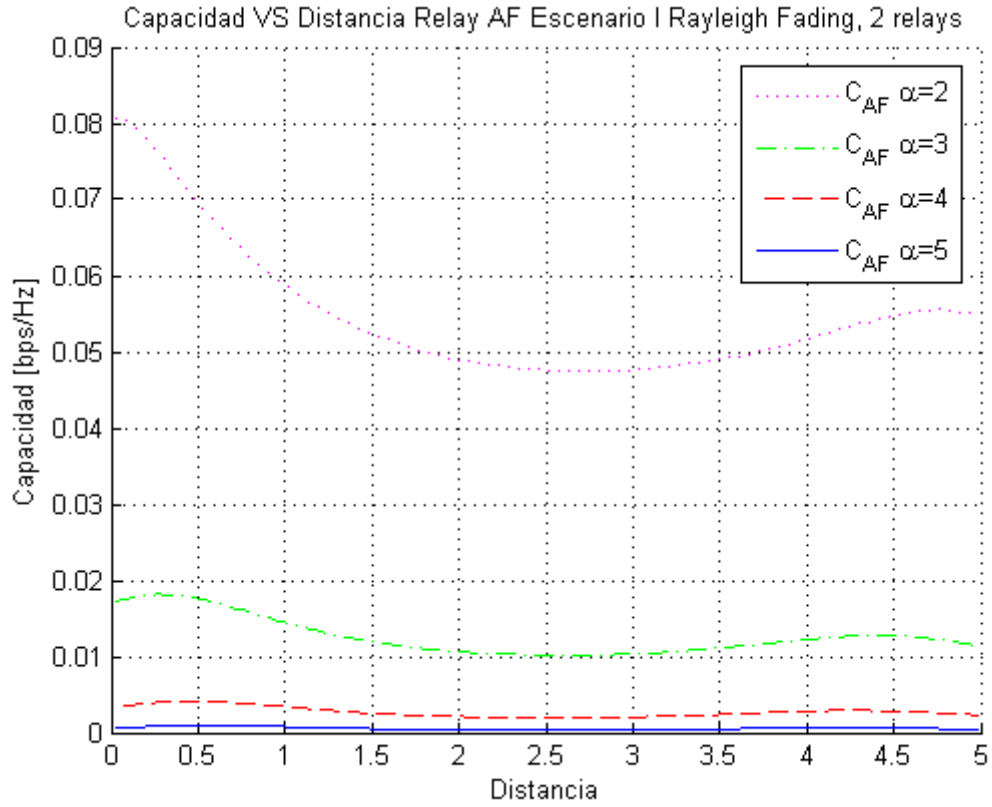


Figura 8.4: Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento

La Figura 8.5 destaca la importancia de una correcta elección de parámetros para conseguir, al menos, alcanzar los valores de capacidad ofrecidos por un sistema que no utilice relays. Para  $\alpha = 4$  se pueden ubicar los dos relays cerca de la fuente o del destino, ya que en ambos se consigue más capacidad que con la transmisión directa.

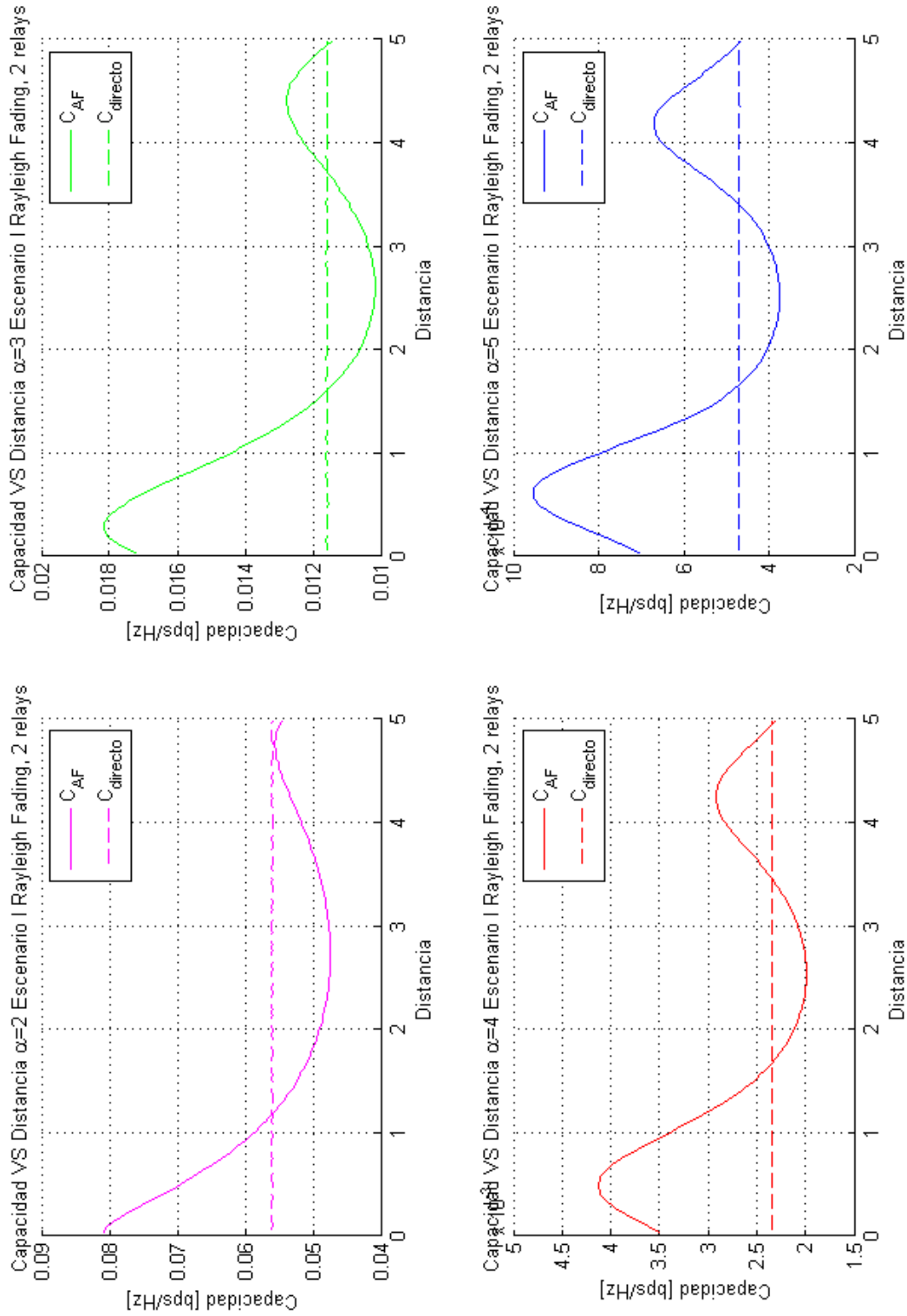


Figura 8.5: Capacidad VS Distancia Escenario IV', exponente de pérdidas, desvanecimiento

Por último, se muestra (Figura 8.6) la comparativa entre el Escenario I' y la transmisión sin relay para potencias y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

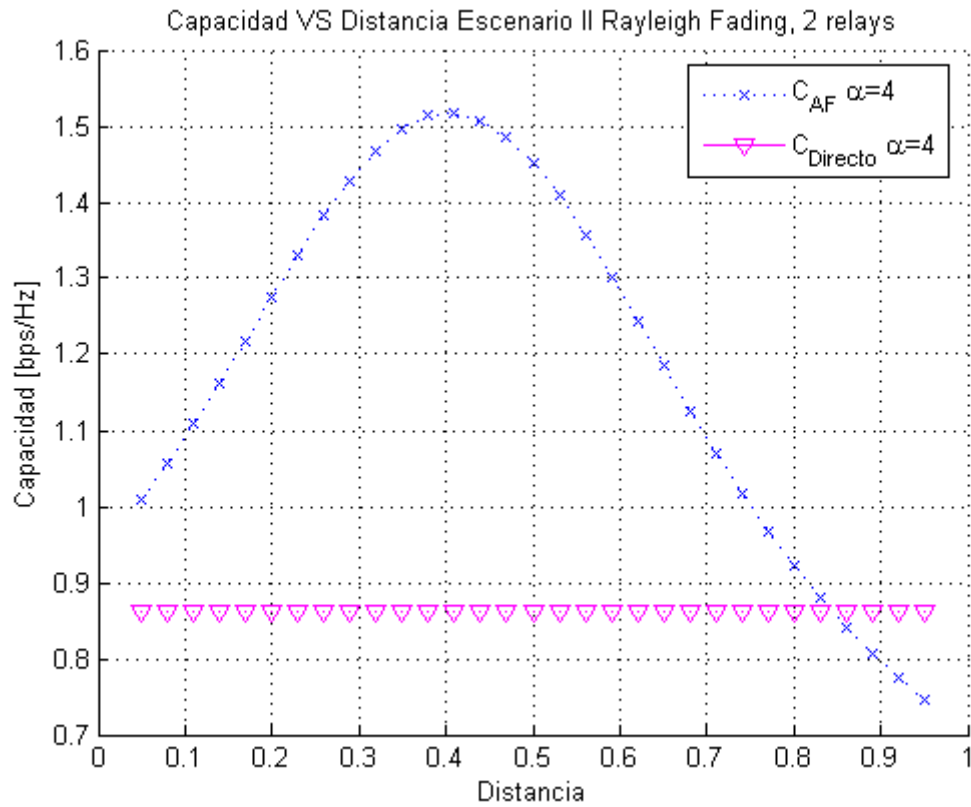


Figura 8.6: Capacidad VS Distancia Escenario I', con desvanecimiento

## 8.2. ESCENARIO II"

## 8.2.1. AF

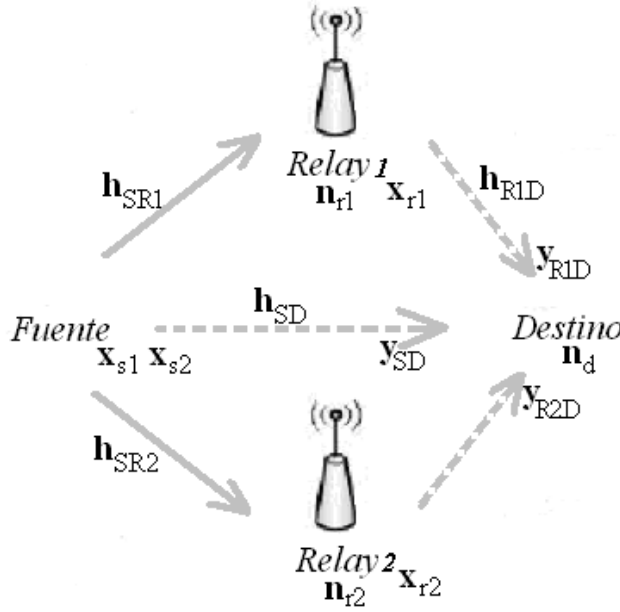


Figura 8.7: Escenario II"

En el escenario de la Figura 8.7,  $x_{s1}$ ,  $x_{s2}$  denotan la señal transmitida por la fuente durante el primer TS y el segundo TS;  $x_{r1}$  y  $x_{r2}$  las señales emitidas por el relay uno y el relay dos. Por otro lado,  $y_{SD}$ ,  $y_{SR1}$  y  $y_{SR2}$  son las señales de salida de los canales S-D, S-R1 y S-R2;  $y_{R1D}$  y  $y_{R2D}$  son las señales de salida de los canales R1-D y R2-D. Se definen  $h_{ij}$  como los coeficientes de canal en los que la transmisión se realiza desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ , son modelados como variables aleatorias independientes Gaussianas complejas. Por último,  $n_i$  es el ruido aditivo Gaussiano en el receptor  $i$ .

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR1} = h_{SR1} \cdot x_{s1} + n_{r1} \quad (8.10)$$

$$y_{SR2} = h_{SR2} \cdot x_{s1} + n_{r2} \quad (8.11)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_D = y_{SD} + y_{R1D} + y_{R2D} = h_{SD} \cdot x_{s2} + n_d + h_{R1D} \cdot x_{r1} + h_{R2D} \cdot x_{r2} \quad (8.12)$$

Al igual que en el Escenario II', se llega a:

$$y = y_D = \begin{pmatrix} h_{SR1} \cdot f_1 \cdot h_{R1D} + h_{SR2} \cdot f_2 \cdot h_{R2D} & h_{SD} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \cdot h_{R1D} & f_2 \cdot h_{R2D} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{r1} \\ n_{r2} \\ n_d \end{pmatrix} \quad (8.13)$$

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene (siguiendo la misma pauta que en el escenario anterior):

$$C_{AF2''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \text{SNR}_{SD}}{1 + A + B} \right] \quad (8.14)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (8.15)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (8.16)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_d^2} \quad \text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s \cdot |h_{SRi}|^2}{\sigma_{ri}^2} \quad \text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri} \cdot |h_{RiD}|^2}{\sigma_d^2} \quad (8.17)$$

### 8.2.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

#### Capacidad y potencia

La Figura 8.8 muestra los valores de capacidad obtenidos en el sistema (ver Figura 8.7) cuando los dos relays están a distancia intermedia entre la fuente y el destino, encontrándose separados estos terminales distancia unidad (normalizada). Los valores de la varianza de ruido en cualquiera de los receptores es igual a la unidad. Por último, los valores de la potencia emitida por la fuente y ambos relays se van variando de manera conjunta.

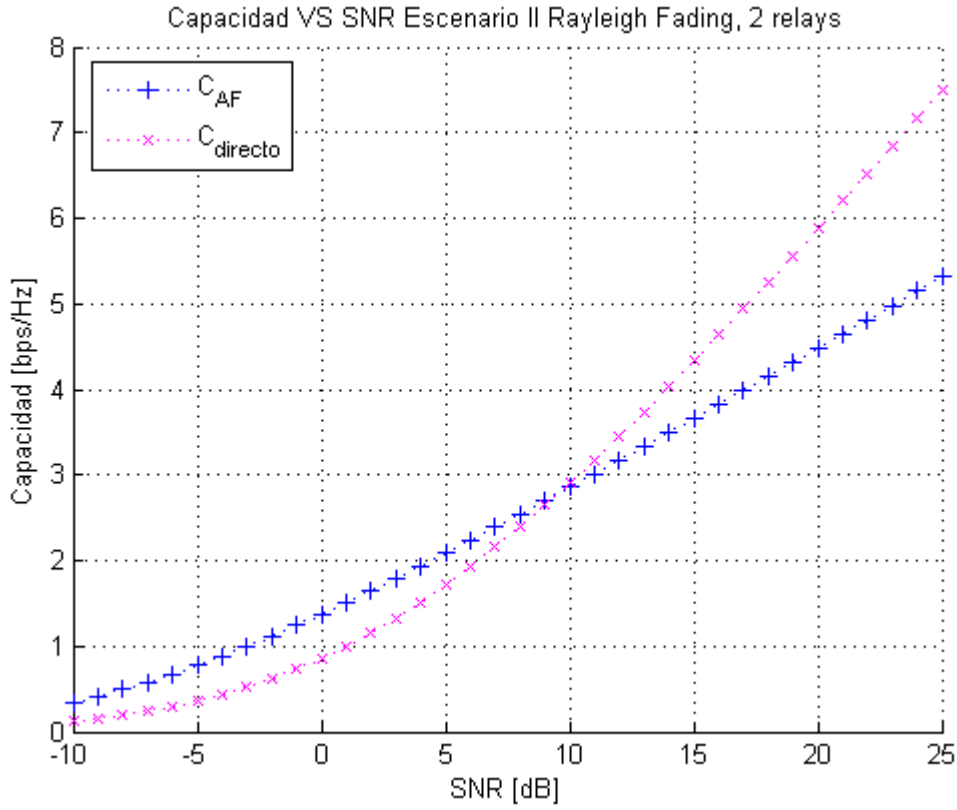


Figura 8.8: Capacidad VS Potencia Escenario II', con desvanecimiento

Al igual que para la correspondiente simulación del Escenario I', conforme aumenta el nivel de potencia transmitido, la capacidad también aumenta. En este escenario los valores son ligeramente inferiores a los de aquel, ya que el factor  $SNR_{SD}$  de la Ec. 8.14 no se encuentra escalado por el denominador  $(1 + A + B)$ . Se pueden ver dos regiones:

$$SNR < 10dB \rightarrow C_{AF} > C_{directo}$$

$$SNR > 10dB \rightarrow C_{directo} > C_{AF}$$

### Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

En este caso los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays valen  $1[W]$  y los valores de la varianza de ruido en los receptores son iguales a la unidad. Se normaliza a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que ambos relays se ubiquen en cualquier posición intermedia, pero desplazándose a la par.

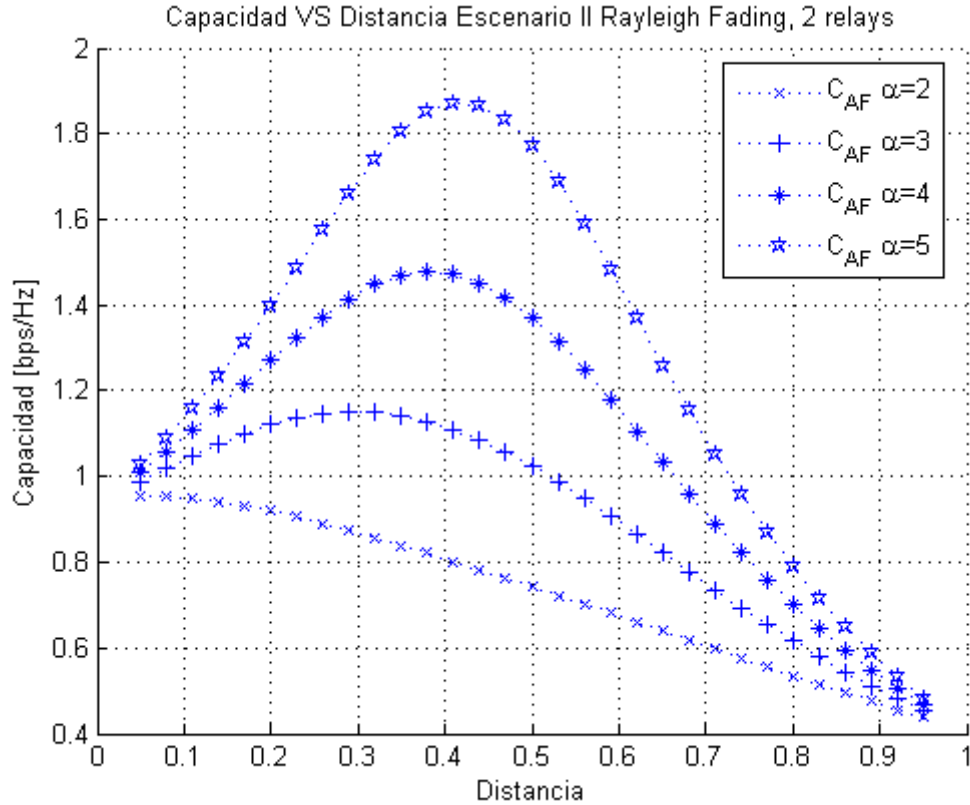


Figura 8.9: Capacidad VS Distancia Escenario II", con desvanecimiento

El comportamiento del valor de la capacidad de la Figura 8.9 es el mismo que el del Escenario I". Los valores de la capacidad resultan aquí ligeramente inferiores debido al motivo expuesto en el apartado anterior.

### Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

En este apartado el único parámetro que cambia es la distancia entre fuente y destino, que pasa a valer 5 unidades normalizadas. En la Figura 8.10 se observa cómo la capacidad empieza siendo máxima y conforme la distancia entre fuente y relay se hace mayor, la capacidad disminuye.

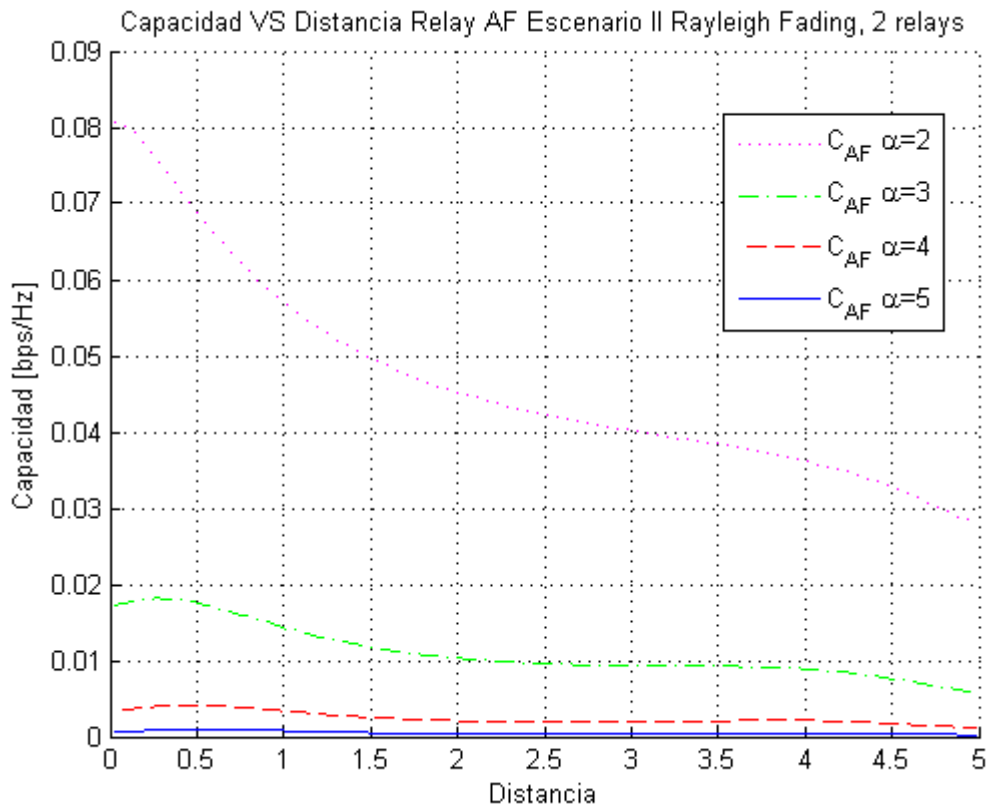


Figura 8.10: Capacidad VS Distancia Escenario II", con desvanecimiento

La siguiente Figura 8.11 muestra los valores de capacidad en función de la distancia según sea el valor del exponente de pérdidas. En el caso en el que  $\alpha = 4$  resulta conveniente ubicar los dos relays cerca de la fuente con el fin de obtener más capacidad que con la transmisión directa.



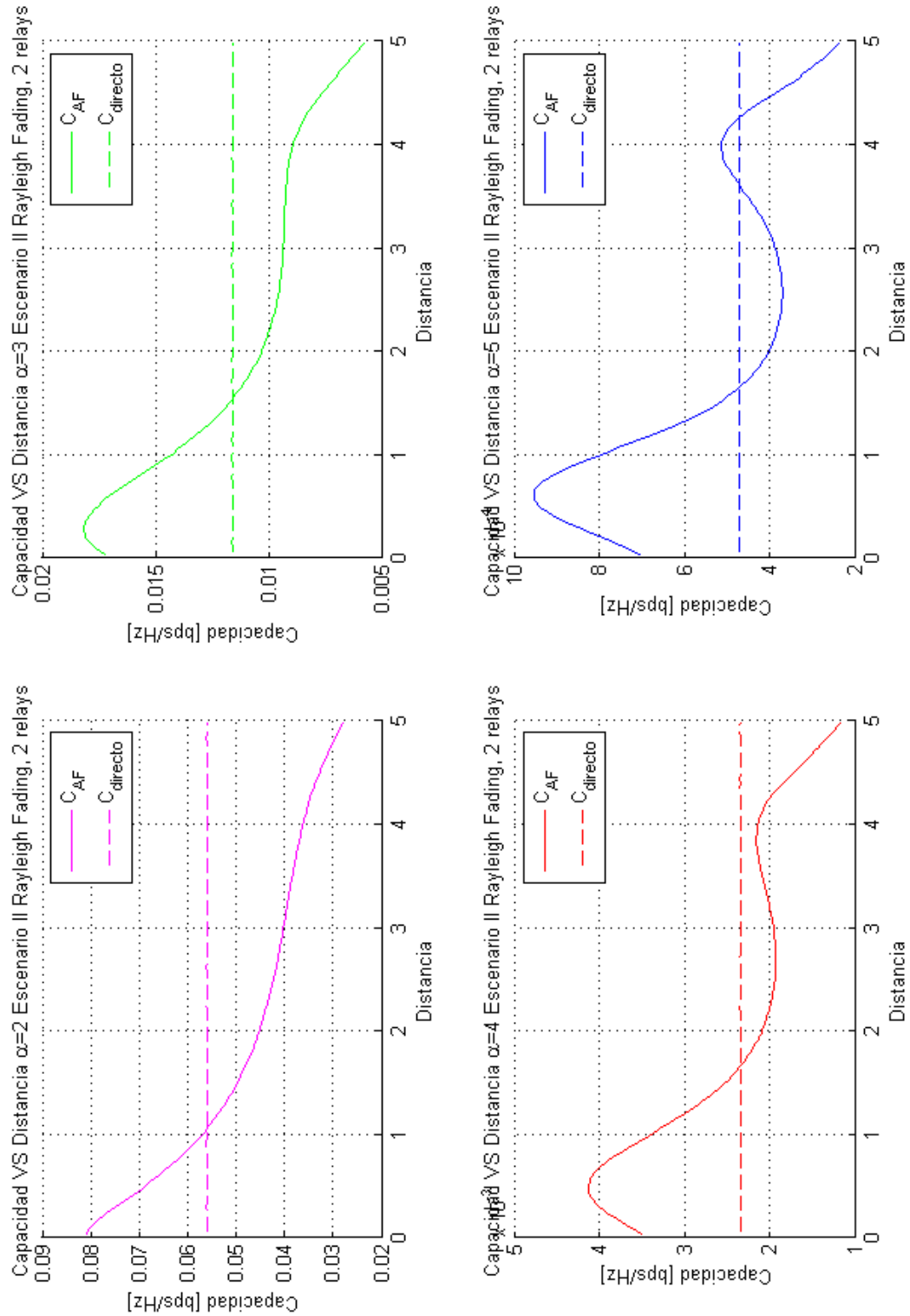


Figura 8.11: Capacidad VS Distancia Escenario II', exponente de pérdidas, desvanecimiento

Por último, se muestra (Figura 8.12) la comparativa entre el Escenario II' y la transmisión sin relay para potencias de 1[W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

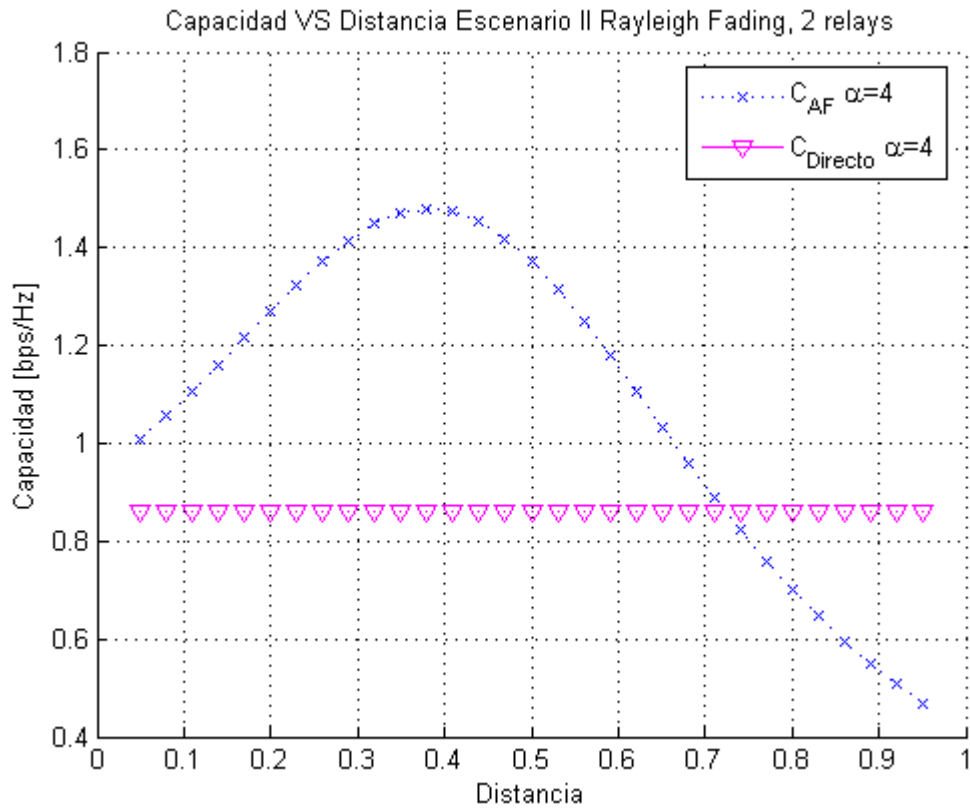


Figura 8.12: Capacidad VS Distancia Escenario II', con desvanecimiento

### 8.3. ESCENARIO III"

#### 8.3.1. AF

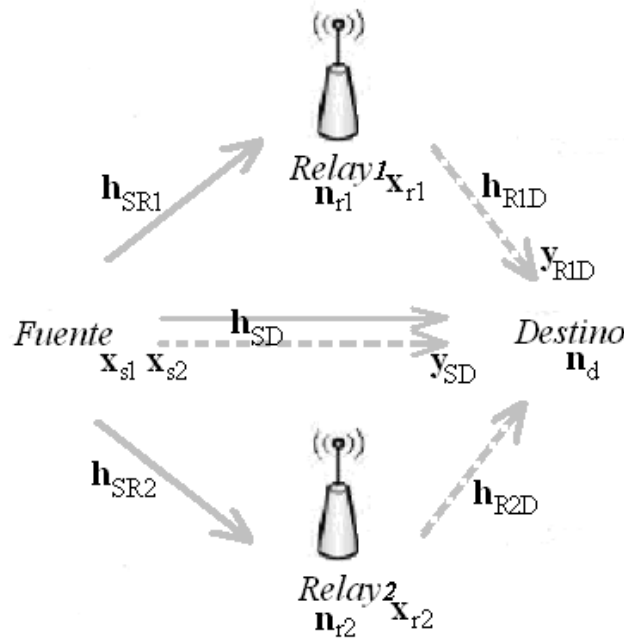


Figura 8.13: Escenario III"

En el escenario de la Figura 8.13, al igual que en el escenario anterior,  $x_{s1}$ ,  $x_{s2}$  denotan la señal transmitida por la fuente durante el primer TS y el segundo TS;  $x_{r1}$  y  $x_{r2}$  las señales emitidas por el relay uno y el relay dos. Por otro lado,  $y_{SD}$ ,  $y_{SR1}$  y  $y_{SR2}$  son las señales de salida de los canales S-D, S-R1 y S-R2;  $y_{R1D}$  y  $y_{R2D}$  son las señales de salida de los canales R1-D y R2-D. Se definen  $h_{ij}$  como los coeficientes de canal en los que la transmisión se realiza desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ . Por último,  $n_i$  es el ruido aditivo Gaussiano en el receptor  $i$ .

■ 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR1} = h_{SR1} \cdot x_{s1} + n_{r1} \quad (8.18)$$

$$y_{SR2} = h_{SR2} \cdot x_{s1} + n_{r2} \quad (8.19)$$

$$y_{SD} = h_{SD} \cdot x_{s1} + n_{d1} \quad (8.20)$$

■ 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_D = y_{SD} + y_{R1D} + y_{R2D} = h_{SD} \cdot x_{s2} + n_{d2} + h_{R1D} \cdot x_{r1} + h_{R2D} \cdot x_{r2} \quad (8.21)$$

Al igual que en el Escenario III', se llega a :

$$\begin{pmatrix} y_{SD} \\ y_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{SD} & 0 \\ h_{SR1}f_1h_{R1D} + h_{SR2}f_2h_{R2D} & h_{SD} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ f_1h_{R1D} & f_2h_{R2D} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{r1} \\ n_{r2} \\ n_{d1} \\ n_{d2} \end{pmatrix} \quad (8.22)$$

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF3''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \text{SNR}_{SD} [2 + A + B + \text{SNR}_{SD}]}{1 + A + B} \right] \quad (8.23)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (8.24)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (8.25)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_{d1}^2} \quad \text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s \cdot |h_{SRi}|^2}{\sigma_{ri}^2} \quad \text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri} \cdot |h_{RiD}|^2}{\sigma_{d2}^2} \quad (8.26)$$

### 8.3.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

#### Capacidad y potencia

La Figura 8.14 muestra los valores de capacidad obtenidos en el sistema (ver Figura 8.7) cuando los dos relays están a distancia intermedia entre la fuente y el destino, encontrándose separados estos terminales distancia unidad (normalizada). Los valores de la varianza de ruido en cualquiera de los receptores es igual a la unidad. Por último, los valores de la potencia emitida por la fuente y ambos relays se van variando de manera conjunta.

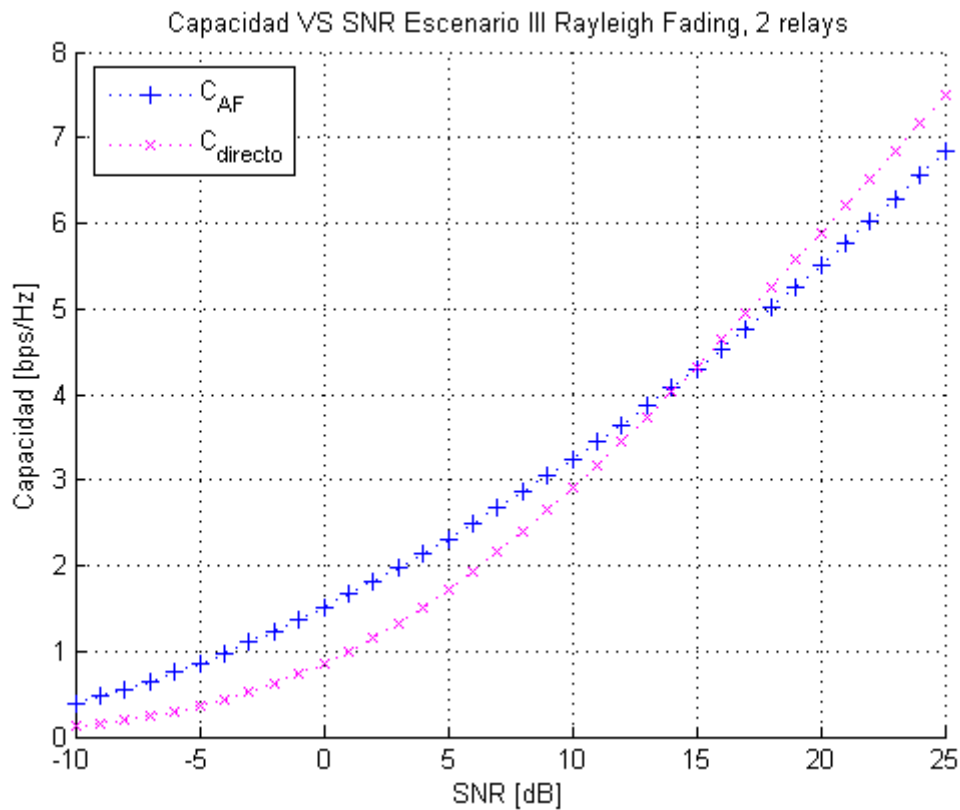


Figura 8.14: Capacidad VS Potencia Escenario III", con desvanecimiento

El resultado obtenido presenta un comportamiento similar al de los dos escenarios anteriores con la salvedad de que en éste, los valores de capacidad son entorno a una décima superiores al del Escenario I". Se pueden distinguir las siguientes regiones:

$$SNR < 15dB \rightarrow C_{AF} > C_{directo}$$

$$SNR > 15dB \rightarrow C_{directo} > C_{AF}$$

### Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

En este caso los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays son 1 [W] y los valores de la varianza de ruido en los receptores son iguales a la unidad. Se normaliza a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que ambos relays se ubiquen en cualquier posición intermedia, pero desplazándose a la par.

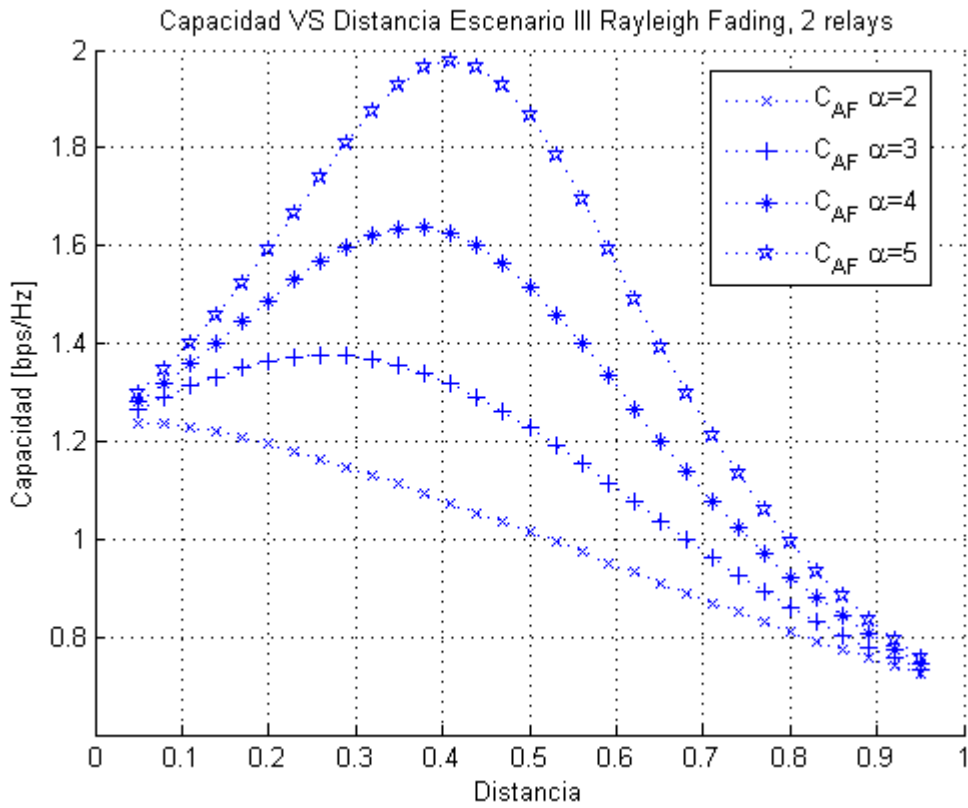


Figura 8.15: Capacidad VS Distancia Escenario III', con desvanecimiento

La Figura 8.15 muestra que los valores máximos de capacidad se obtienen en posiciones de los relays intermedias entre la fuente y destino, y conforme se aleja de dichas ubicaciones los valores disminuyen. Además, dichos valores decrecen en mayor medida en las posiciones de los relays más cercanas al destino. Este comportamiento es idéntico al de los dos escenarios anteriores, sin embargo, los valores de capacidad son ligeramente superiores, tal y como ocurriría en la simulación previa.

### Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

En este apartado el único parámetro que cambia es la distancia entre fuente y destino, que pasa a valer 5 unidades normalizadas. En la Figura 8.16 se observa cómo la capacidad empieza siendo máxima y conforme la distancia entre fuente y relay se hace mayor, la capacidad disminuye.

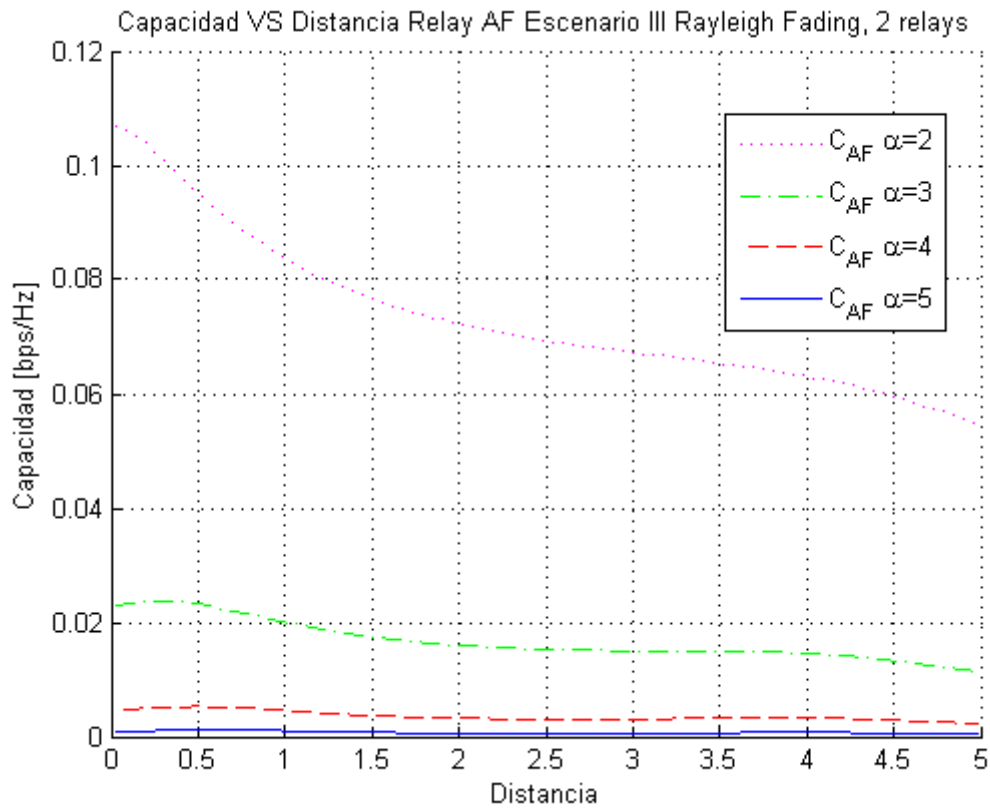
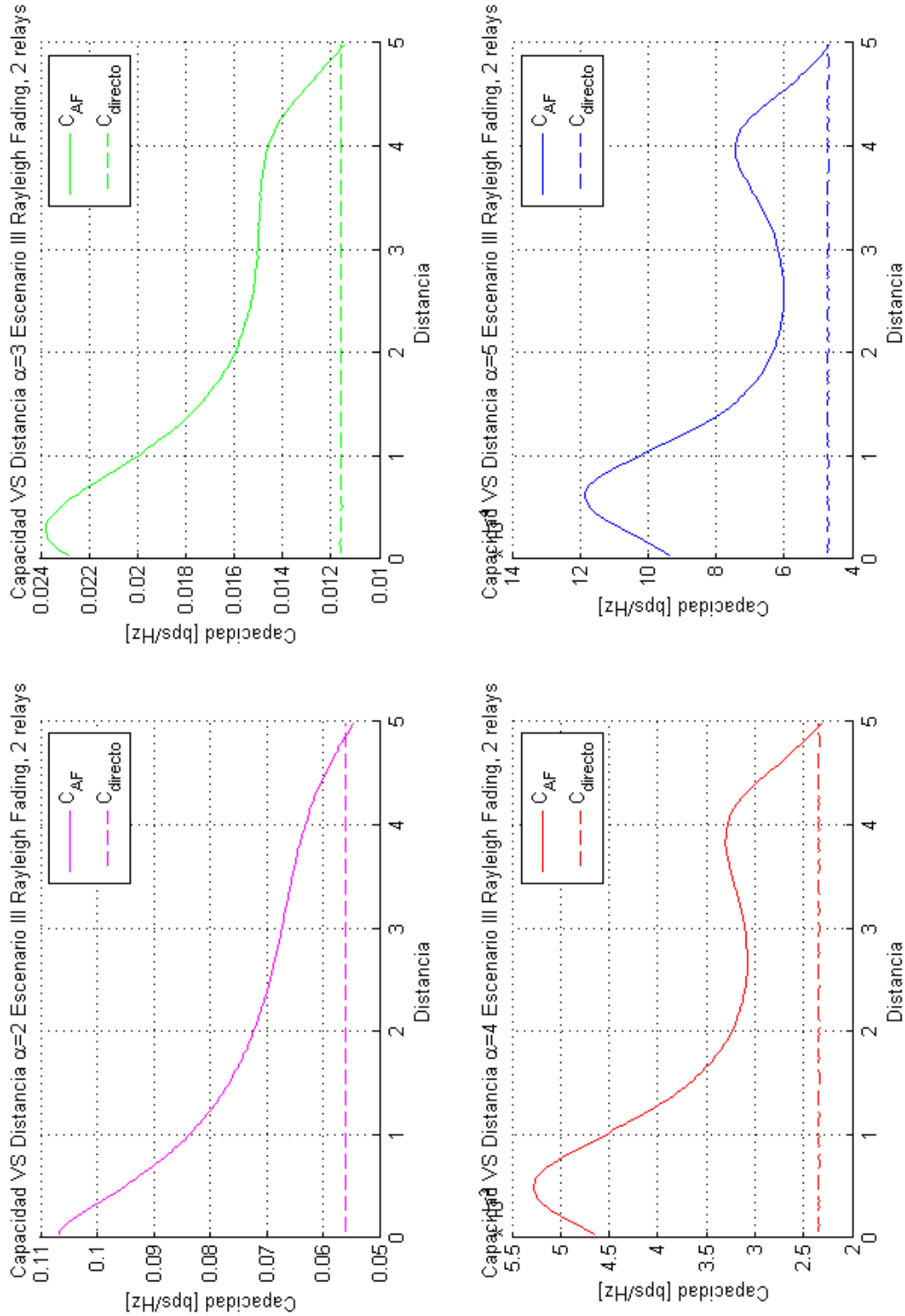


Figura 8.16: Capacidad VS Distancia Escenario III', con desvanecimiento

En la siguiente Figura 8.17 se muestran los valores de capacidad en función de la distancia según sea el valor del exponente de pérdidas. Se puede apreciar claramente cómo, sea cual sea el valor del exponente de pérdidas, la capacidad alcanzada en cualquier posición de los relays es superior al de la transmisión directa.

Figura 8.17: Capacidad VS Distancia Escenario III<sup>o</sup>, exponente de pérdidas, desvanecimiento



Por último, se muestra (Figura 8.18) la comparativa entre el Escenario III'' y la transmisión sin relay para potencias de 1[W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

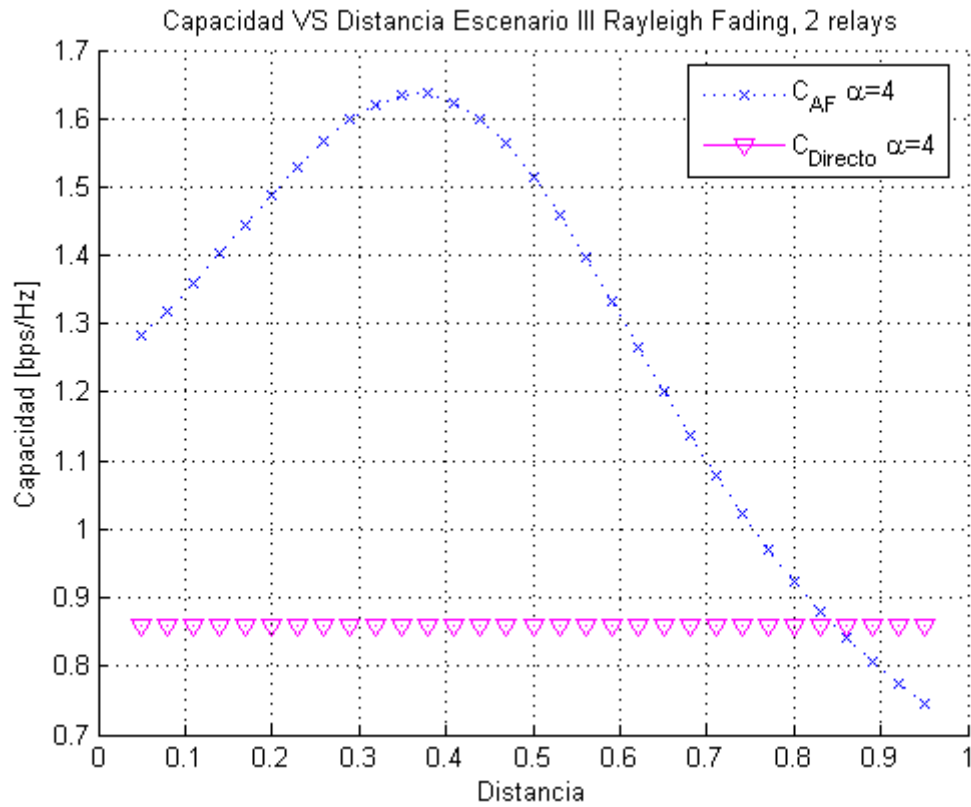


Figura 8.18: Capacidad VS Distancia Escenario III'', con desvanecimiento

## 8.4. ESCENARIO IV''

## 8.4.1. AF

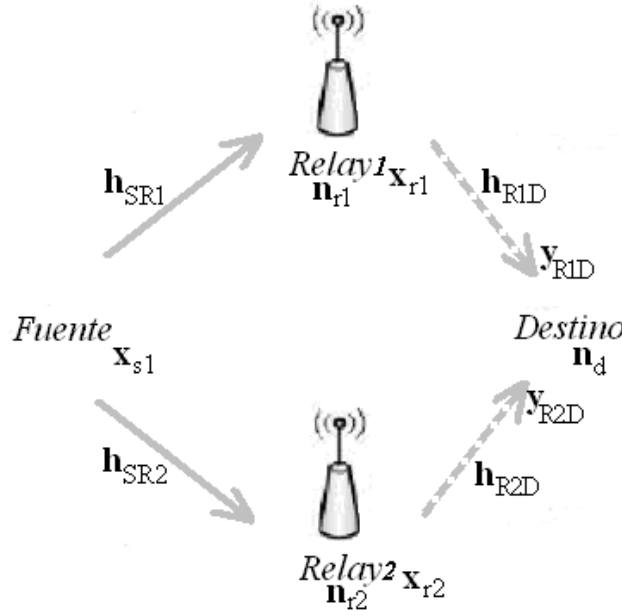


Figura 8.19: Escenario IV''

En el escenario de la Figura 8.19, al igual que en el escenario anterior,  $x_{s1}$  denota la señal transmitida por la fuente durante el primer TS;  $x_{r1}$  y  $x_{r2}$  las señales emitidas por el relay uno y el relay dos. Por otro lado,  $y_{SR1}$  y  $y_{SR2}$  son las señales de salida de los canales S-R1 y S-R2;  $y_{R1D}$  y  $y_{R2D}$  son las señales de salida de los canales R1-D y R2-D. Se definen  $h_{ij}$  como los coeficientes de canal en los que la transmisión se realiza desde el nodo  $i$  hacia el nodo  $j$ . Por último,  $n_i$  es el ruido aditivo Gaussiano en el receptor  $i$ .

- 1<sup>er</sup> Time Slot:

$$y_{SR1} = h_{SR1} \cdot x_{s1} + n_{r1} \quad (8.27)$$

$$y_{SR2} = h_{SR2} \cdot x_{s1} + n_{r2} \quad (8.28)$$

- 2<sup>o</sup> Time Slot:

$$y_D = y_{R1D} + y_{R2D} = h_{R1D} \cdot x_{r1} + h_{R2D} \cdot x_{r2} + n_d \quad (8.29)$$

Al igual que en el Escenario IV', se llega a:

$$y_D = (h_{SR1}f_1h_{R1D} + h_{SR2}f_2h_{R2D}) \cdot x_{s1} + \begin{pmatrix} f_1h_{R1D} & f_2h_{R2D} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{r1} \\ n_{r2} \\ n_d \end{pmatrix} \quad (8.30)$$

Tras realizar los cálculos oportunos, se obtiene:

$$C_{AF4''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2}}{1 + A + B} \right] \quad (8.31)$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (8.32)$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (8.33)$$

El factor  $\frac{1}{2}$  aparece debido a que la información se transmite durante dos TS. Los términos  $\text{SNR}_{ij}$  definen la relación señal a ruido existente en el canal de comunicación entre los terminales i-j:

$$\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_d^2} \quad \text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s \cdot |h_{SRi}|^2}{\sigma_{ri}^2} \quad \text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri} \cdot |h_{RiD}|^2}{\sigma_d^2} \quad (8.34)$$

### 8.4.2. Resultados numéricos entorno con desvanecimiento

#### Capacidad y potencia

La Figura 8.20 muestra los valores de capacidad obtenidos en el sistema (ver Figura 8.19) cuando los dos relays están a distancia intermedia entre la fuente y el destino, encontrándose separados estos terminales distancia unidad (normalizada). Los valores de la varianza de ruido en cualquiera de los receptores es igual a la unidad. Por último, los valores de la potencia emitida por la fuente y ambos relays se van variando de manera conjunta.

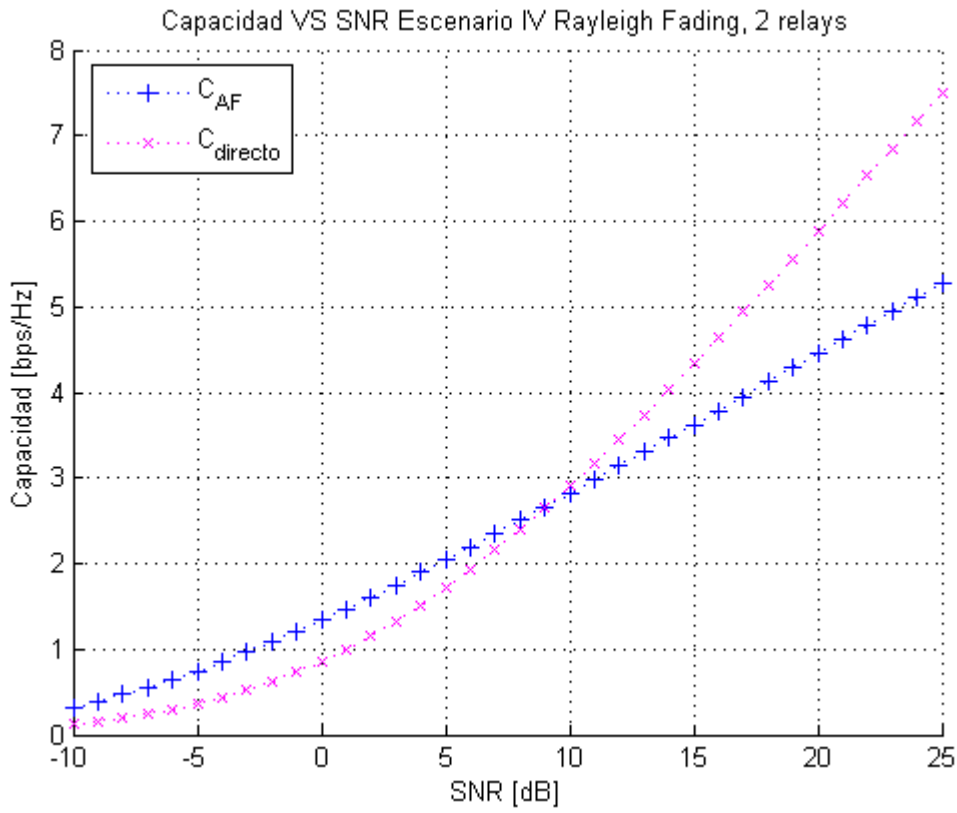


Figura 8.20: Capacidad VS Potencia Escenario IV", con desvanecimiento

El resultado obtenido presenta un comportamiento similar al de los dos escenarios previos. Dado que en este escenario no hay comunicación directa entre fuente y destino, el término  $SNR_{SD}$  no aparece en la Ec. 8.31 Se pueden distinguir las siguientes regiones:

$$SNR < 9,5dB \rightarrow C_{AF} > C_{directo}$$

$$SNR > 9,5dB \rightarrow C_{directo} > C_{AF}$$

### Capacidad y pérdidas: Distancia menor que la unidad

En este caso los valores de potencia emitidos por la fuente y los relays son de  $1[W]$  y los valores de la varianza de ruido en los receptores son iguales a la unidad. Se normaliza a la unidad la distancia entre fuente y destino, permitiendo que ambos relays se ubiquen en cualquier posición intermedia, pero desplazándose a la par.

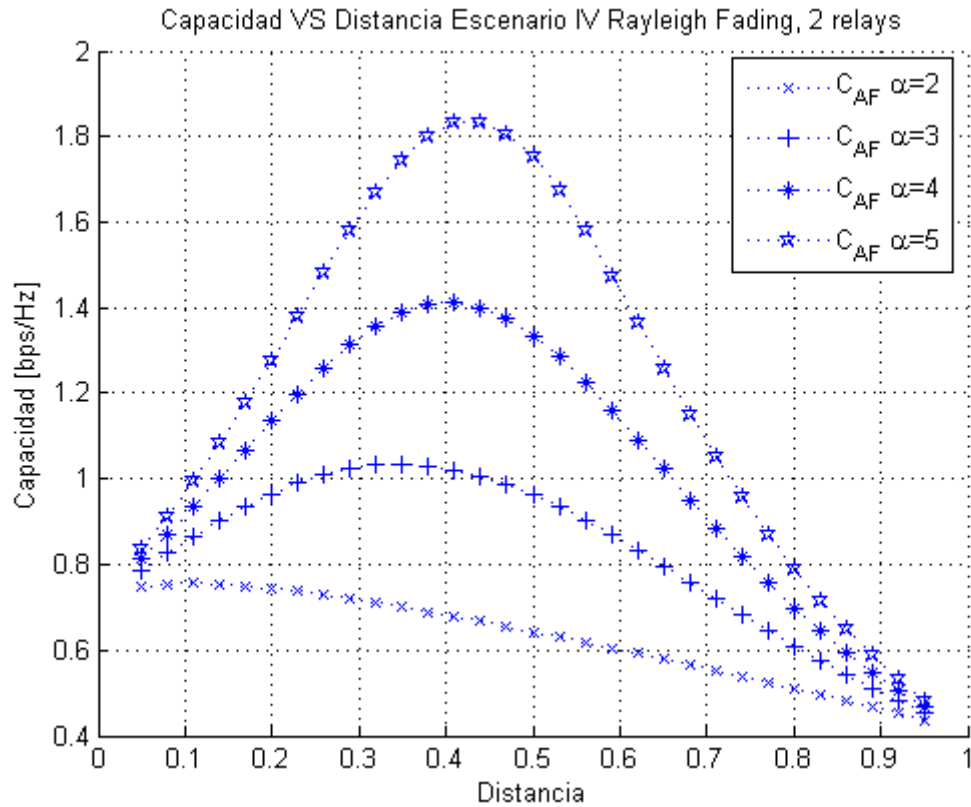


Figura 8.21: Capacidad VS Distancia Escenario IV'', con desvanecimiento

La Figura 8.21 muestra un comportamiento similar al de los escenarios anteriores ofreciendo valores inferiores de capacidad, ya que no hay comunicación directa entre fuente y destino.

### Capacidad y pérdidas: Distancia mayor que la unidad

En este apartado el único parámetro que cambia es la distancia entre fuente y destino, que pasa a valer 5 unidades normalizadas. En la Figura 8.22 se aprecia la existencia de un valor mínimo y dos máximos de capacidad, de manera similar a como ocurría en el Escenario I’.

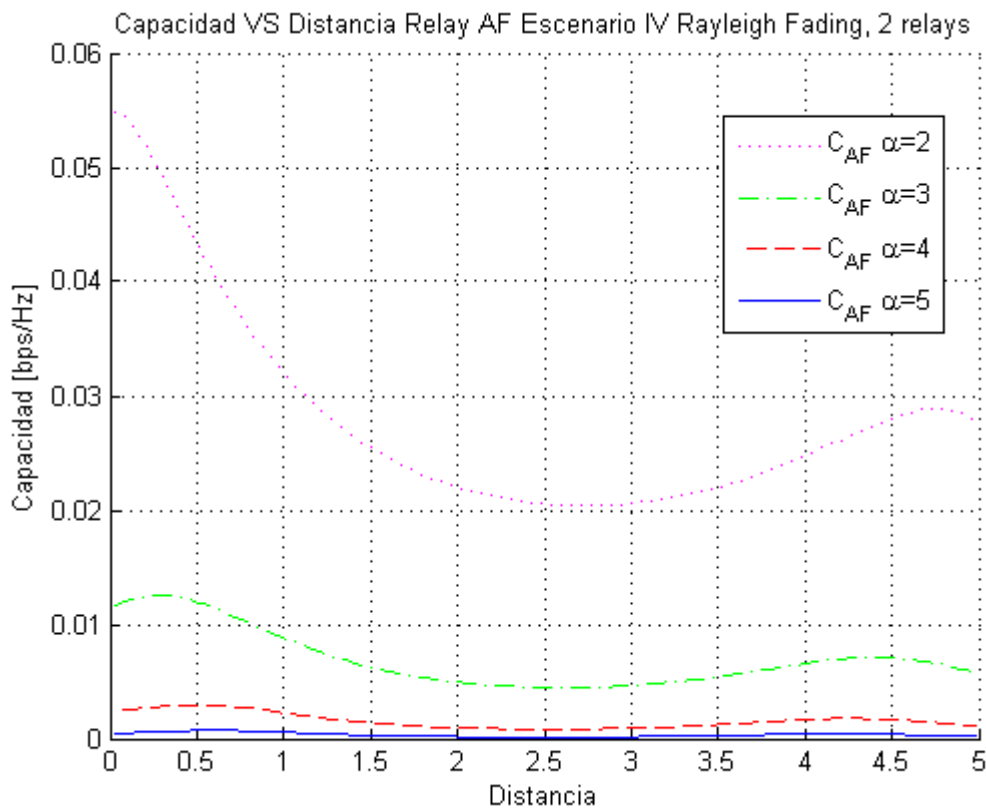


Figura 8.22: Capacidad VS Distancia Escenario IV”, con desvanecimiento

En la siguiente Figura 8.23 se muestran los valores de capacidad en función de la distancia según sea el valor del exponente que mejor modele las pérdidas existentes en la comunicación. Es relevante destacar que para  $\alpha = 2$  no hay ninguna posición para los relays en la que la capacidad llegue ni siquiera a igualar a la del sistema de transmisión directa. para  $\alpha = 4$  sólo se supera en entornos próximos a la fuente.

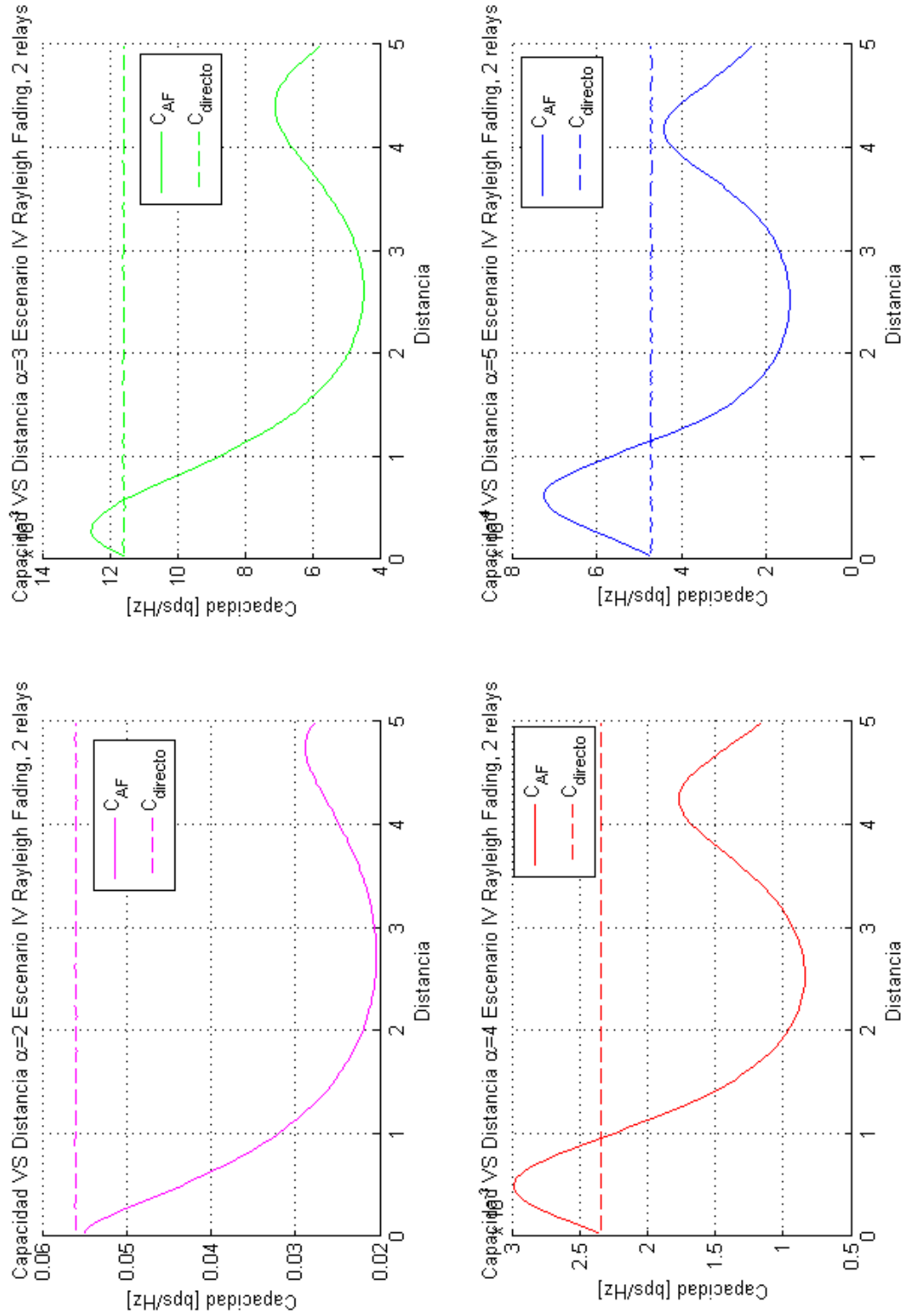


Figura 8.23: Capacidad VS Distancia Escenario IV", exponente de pérdidas, desvanecimiento

Por último, se muestra (Figura 8.24) la comparativa entre el Escenario IV<sup>o</sup> y la transmisión sin relay para potencias de 1 [W] y varianzas de ruido iguales a uno, con un exponente de pérdidas de valor cuatro.

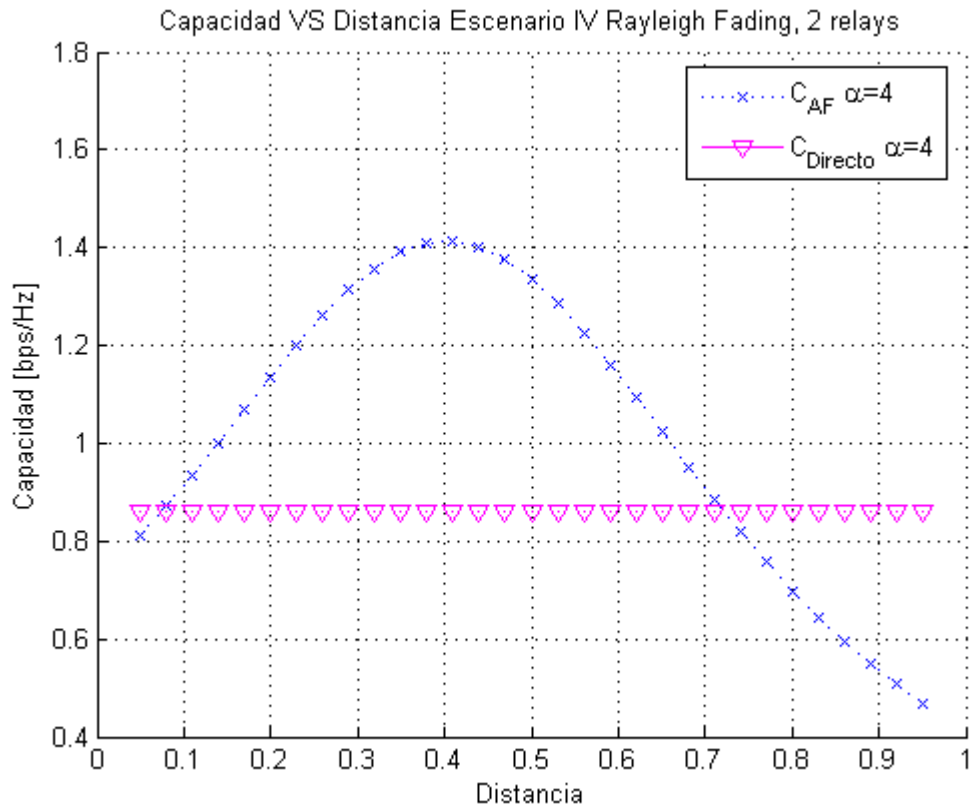


Figura 8.24: Capacidad VS Distancia Escenario IV<sup>o</sup>, con desvanecimiento



## CONCLUSIONES

En el proyecto se han estudiado diversos escenarios en los que se utiliza la comunicación cooperativa asistida mediante relays, para ello se ha tenido en cuenta el número de relays a utilizar, el modo de funcionamiento *half-duplex* y el tipo de estrategia AF y/o DF.

Tal y como se anunciaba al inicio del proyecto, no es posible dar una regla general que proporcione un valor óptimo de capacidad. Los parámetros que cobran una mayor importancia en el cálculo de la misma son: las potencias transmitidas por la fuente y el relay, el nivel de pérdidas (marcado por su coeficiente  $\alpha$ ), el escenario de comunicación, así como la ubicación del relay.

Aún así, se podría afirmar que el escenario que ofrece valores de capacidad más elevados es el Escenario III, ya se emplee una estrategia AF o una DF. Así mismo, si el relay tuviera que posicionarse cerca de la fuente o del destino, la estrategia AF podría ser más adecuada; pero en lugares intermedios la estrategia DF sería la óptima.

Cuando el destino no sea capaz recibir información de la fuente durante dos TS, los Escenarios I y II serán las opciones a elegir, o el Escenario IV cuando la transmisión entre fuente y destino se realice únicamente a través de un relay. En estas ocasiones resulta necesaria una correcta elección de parámetros, ya que, como se ha visto, se puede dar el caso en el que ni siquiera se alcance a la transmisión directa en términos de capacidad.

Al emplear dos relays los costes se aumentan, pero puede que resulte la única opción bajo situaciones críticas en las que sea requerido un nivel de capacidad un tanto mayor al habitual. No obstante, sigue siendo imprescindible una correcta elección de parámetros.

A continuación se realiza un recopilatorio de los escenarios en los que se utilizan uno y dos relays, destacando los aspectos más relevantes.

## 9.1. 1 RELAY

### 9.1.1. Capacidad VS Potencia con desvanecimiento

#### Modo AF

Se han asumido los siguientes valores:  $\alpha = 4$ ,  $\sigma^2 = 1$ ,  $distancia_{SR, RD} = 0,5$ ,  $|h_{ij}| = \sqrt{\frac{1}{d_{ij}^\alpha}}$ . La principal diferencia entre la transmisión de información entre el nodo fuente y el nodo destino para una transmisión sin relays y otra en la que se pueda utilizar cualquiera de los escenarios anteriores, reside en que en la primera sólo se consume un TS y en el resto se emplean dos TS. Esto se pone de manifiesto en la Figura 9.1 ya que el factor  $\frac{1}{2}$ , en realidad, al emplear logaritmos, se traduce en  $\sqrt{()}$ , de ahí que el comportamiento de la capacidad en los escenarios se mantenga más lineal ( notar que el eje horizontal está expresado en dB).

Los escenarios I, II y IV ofrecen valores de capacidad similares; superando a los presentados por la transmisión directa para SNR bajas (menores de 9dB) y siendo inferiores para SNR altas.

El escenario III se comporta de modo parecido a los demás si la SNR es baja (menos de 9dB), pero en SNR altas sigue a los valores de capacidad ofrecidos por la transmisión sin relays.

Por todo ello, se podría decir que si se trabaja con SNR bajas podría interesar utilizar cualquiera de los cuatro escenarios; mientras que si se trabaja con SNR altas interesará emplear el tercer escenario y así ofrecer el máximo valor de capacidad.

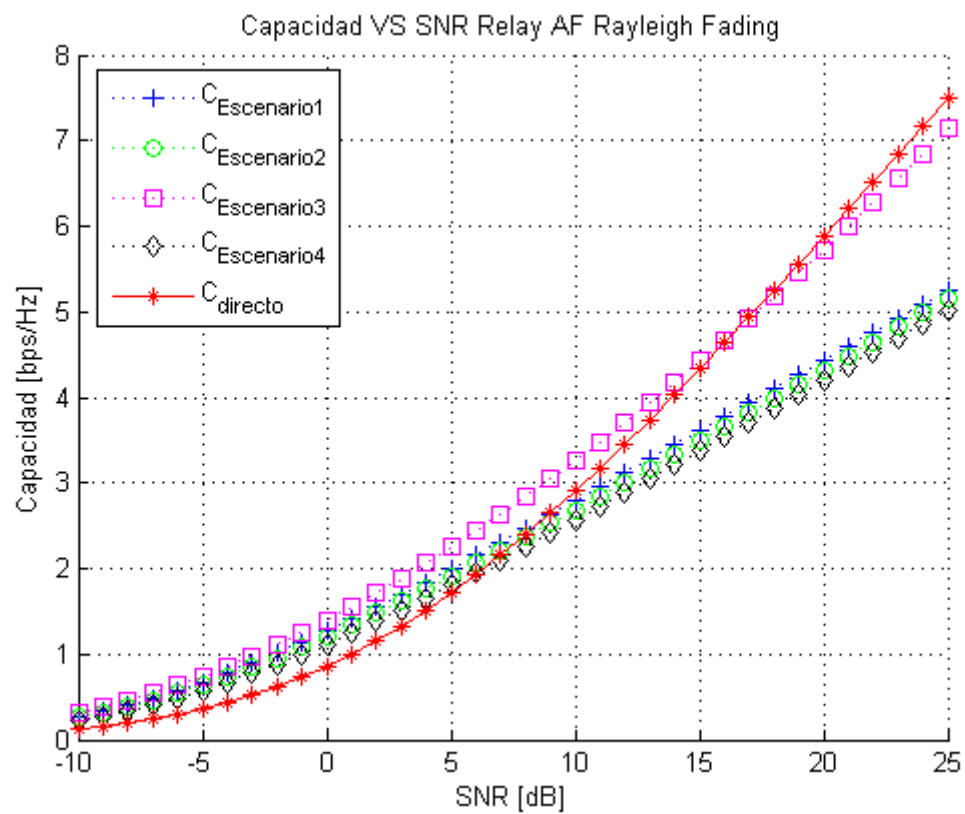


Figura 9.1: Capacidad VS SNR, relay AF, con desvanecimiento

### Modo DF

Con los mismos datos empleados para el modo AF, la Figura 9.2 muestra la simulación para el modo DF.

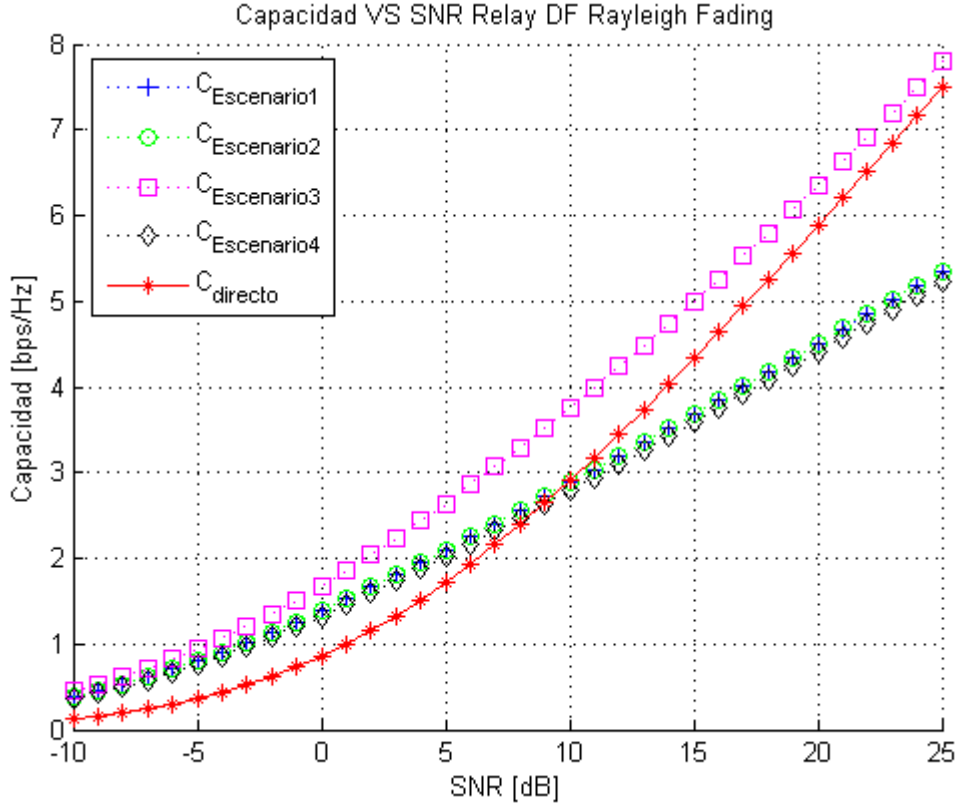


Figura 9.2: Capacidad VS SNR, relay DF, con desvanecimiento

Los escenarios I, II y IV ofrecen valores idénticos de capacidad. Los dos primeros ofrecen la misma respuesta para el modo DF (tal y como se estudió en los correspondientes apartados teóricos, Ec. 2.19 y Ec. 3.14) y en este caso concreto y para cada valor de potencia emitida, los valores de  $\text{SNR}_{ij}$  coinciden (ya que son iguales las distancias entre cualquier pareja de nodos y las varianzas de ruido en el receptor) con lo que el término  $\log_2 \{1 + \text{SNR}_{SR}\}$  es menor que el término  $\log_2 \{1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}\}$ . Por otro lado, el valor de la capacidad para el escenario IV coincide con el de los anteriores escenarios (se verifica de manera directa al ver la Ec. 5.13). Hasta valores de SNR intermedios (unos 12 dB), dichos escenarios ofrecen más capacidad que la transmisión directa, pero para SNR altas, ocurre lo contrario.

En cuanto al escenario III, ofrece valores mayores que la transmisión directa hasta los 21dB, y a partir de aquí van a la par.

Por tanto, se podría concluir que para SNR bajas daría igual emplear cualquier escenario ya que los valores son semejantes. Sin embargo, para valores de SNR intermedios y altos, sería ventajoso emplear el tercer escenario (en términos de capacidad).

### 9.1.2. Capacidad VS Posición con desvanecimiento

#### Modo AF

Se han asumido los siguientes valores:  $\alpha = 4$ ,  $\sigma^2 = 1$ ,  $|h_{ij}| = \sqrt{\frac{1}{d_{ij}^\alpha}}$  y  $P_s = P_r = 1[\text{W}]$ . A partir de la Figura 9.3 se pueden averiguar las posiciones del relay en las que el valor de la capacidad es superior que en la transmisión directa:

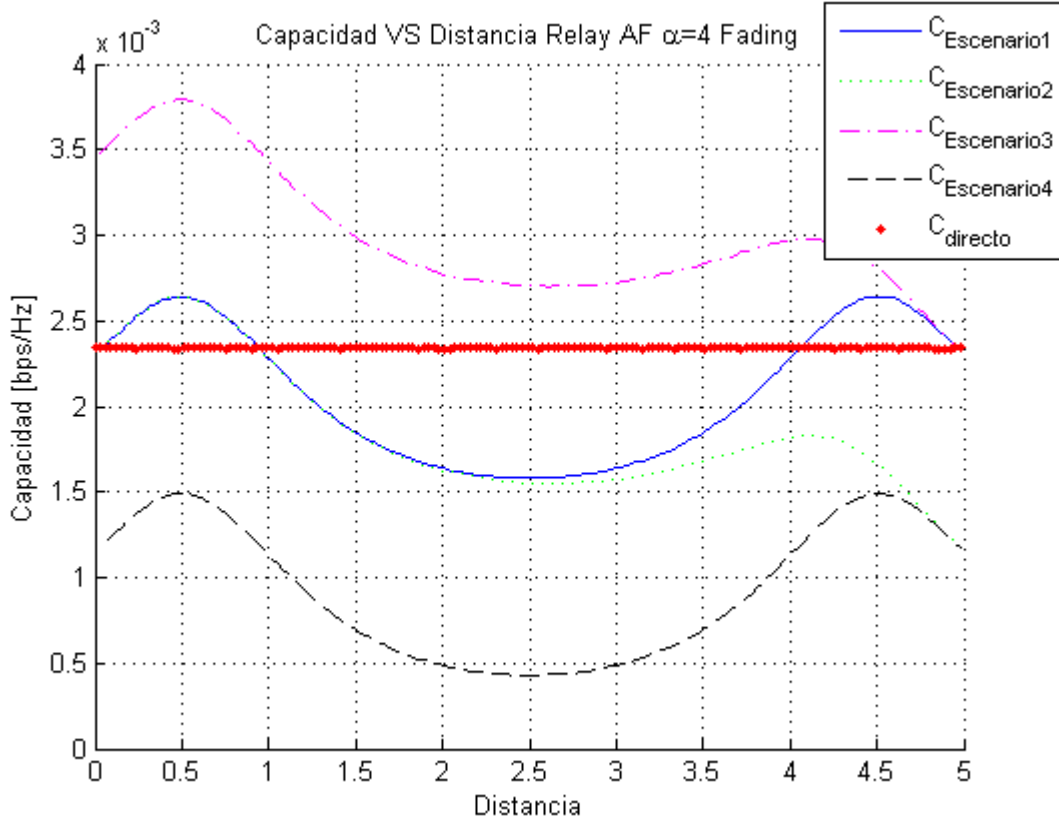


Figura 9.3: Capacidad VS Distancia, relay AF, con desvanecimiento

Tal y como cabía esperar, el escenario III es el que ofrece mejores resultados, ya que para cualquier ubicación del relay se supera el valor de la capacidad de la transmisión directa. Esto es así debido al funcionamiento del relay, ya que la fuente envía información hacia el destino en los dos TS, mientras que los escenarios 1 y 2 sólo lo hacían en uno de los dos. En el escenario IV ni siquiera envía de manera directa la información desde la fuente hacia el destino, lo que hace que este escenario sea el que menores valores de capacidad alcance.

Para el Escenario I las posiciones óptimas son aquellas en las que el relay se encuentre cercano

a la fuente o al destino, mientras que las ínfimas son las que se encuentren en el punto medio de separación entre la fuente y el destino. Esto es así porque al aumentar la separación del relay y la fuente o el destino, la distancia aumenta con lo que la SNR disminuye y en consecuencia el valor de la capacidad. Para el Escenario II sólo es conveniente situar al relay cerca de la fuente y para el Escenario IV es indiferente su ubicación dado que no se consiguen alcanzar los valores de la transmisión directa.

### Modo DF

Con los mismos datos empleados para el modo AF, la Figura 9.4 muestra la simulación para el modo DF.

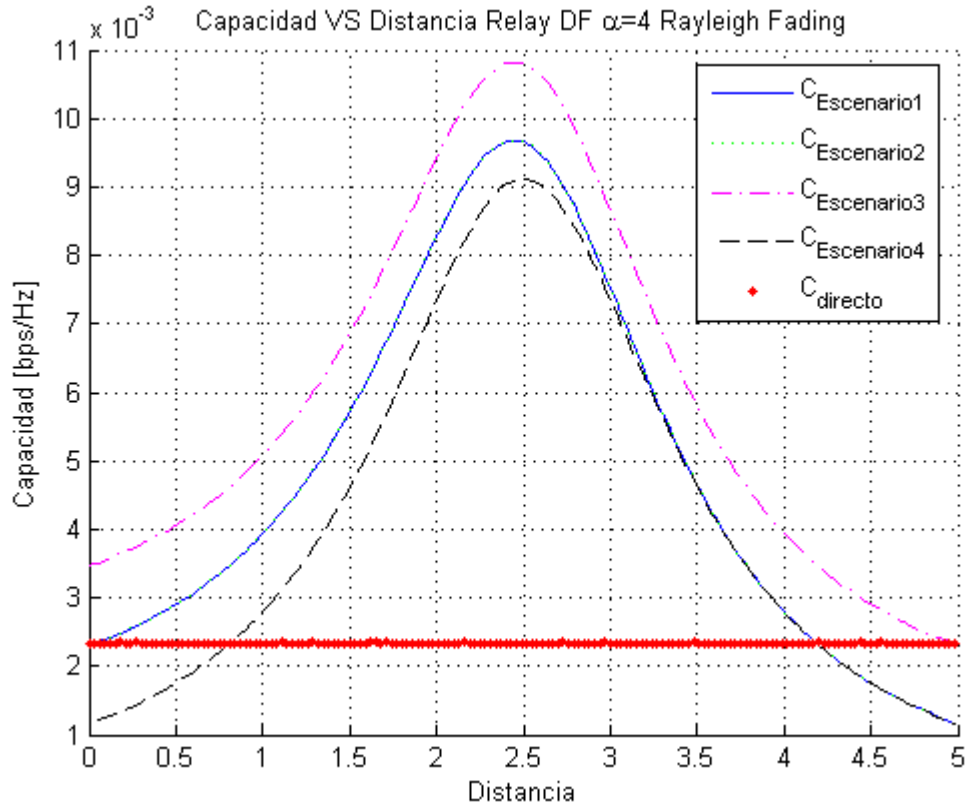


Figura 9.4: Capacidad VS Distancia, relay DF, con desvanecimiento

En el estudio teórico se analizó que los escenarios I y II ofrecían los mismos valores de capacidad. En cuanto al escenario IV, para distancias superiores al punto medio de separación entre fuente y destino, los valores de la capacidad son idénticos a los de los anteriores escenarios porque dicho valor viene limitado por el canal entre fuente y relay, y éste tiene igual valor en los tres escenarios.

Por su parte, el escenario III es el que vuelve a ofrecer mayores valores de capacidad.

En el modo DF los valores de capacidad son máximos en las posiciones intermedias de distancia entre fuente y destino, ya que en su cálculo se buscan siempre los valores mínimos entre una pareja de capacidades.



ESCENARIOS CON UN RELAY	
	$C_{AF_I} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{\text{SNR}_{SR} \cdot \text{SNR}_{RD}}{1 + \text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{RD}} \right]$ $C_{DF_I} = \frac{1}{2} \min \{ \log_2 (1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}), \log_2 (1 + \text{SNR}_{SR}) \}$
	$C_{AF_{II}} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{\text{SNR}_{SR} \cdot \text{SNR}_{RD} + \text{SNR}_{SR} \cdot \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}}{1 + \text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{RD}} \right]$ $C_{DF_{II}} = \frac{1}{2} \min \{ \log_2 (1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}), \log_2 (1 + \text{SNR}_{SR}) \}$
	$C_{AF_{III}} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{\text{SNR}_{SD} \cdot (\text{SNR}_{SR} + 1) \cdot (2 + \text{SNR}_{SD}) + \text{SNR}_{RD} \cdot (\text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{SD})}{1 + \text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{RD}} \right]$ $C_{DF_{III}} = \frac{1}{2} \min \{ \log_2 F, \log_2 G \}$ $F = (1 + \text{SNR}_{SD}) \cdot (1 + \text{SNR}_{SD} + \text{SNR}_{RD}) - \text{SNR}_{RD} \cdot \text{SNR}_{SD}$ $G = (1 + \text{SNR}_{SD}) + (1 + \text{SNR}_{SR})$
	$C_{AF_{IV}} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{\text{SNR}_{SR} \cdot \text{SNR}_{RD}}{1 + \text{SNR}_{SR} + \text{SNR}_{RD}} \right]$ $C_{DF_{IV}} = \frac{1}{2} \min \{ \log_2 (1 + \text{SNR}_{RD}), \log_2 (1 + \text{SNR}_{SR}) \}$

Tabla 9.1: Resumen capacidad 1 relay

## 9.2. 2 RELAYS MODO AF:

### RECEPTOR SUMA EN AMPLITUD

#### 9.2.1. Capacidad VS Potencia con desvanecimiento

Se han asumido los siguientes valores:  $\alpha = 4$ ,  $\sigma^2 = 1$ ,  $distancia_{SR, RD} = 0,5$ ,  $|h_{ij}| = \sqrt{\frac{1}{d_{ij}^\alpha}}$ .

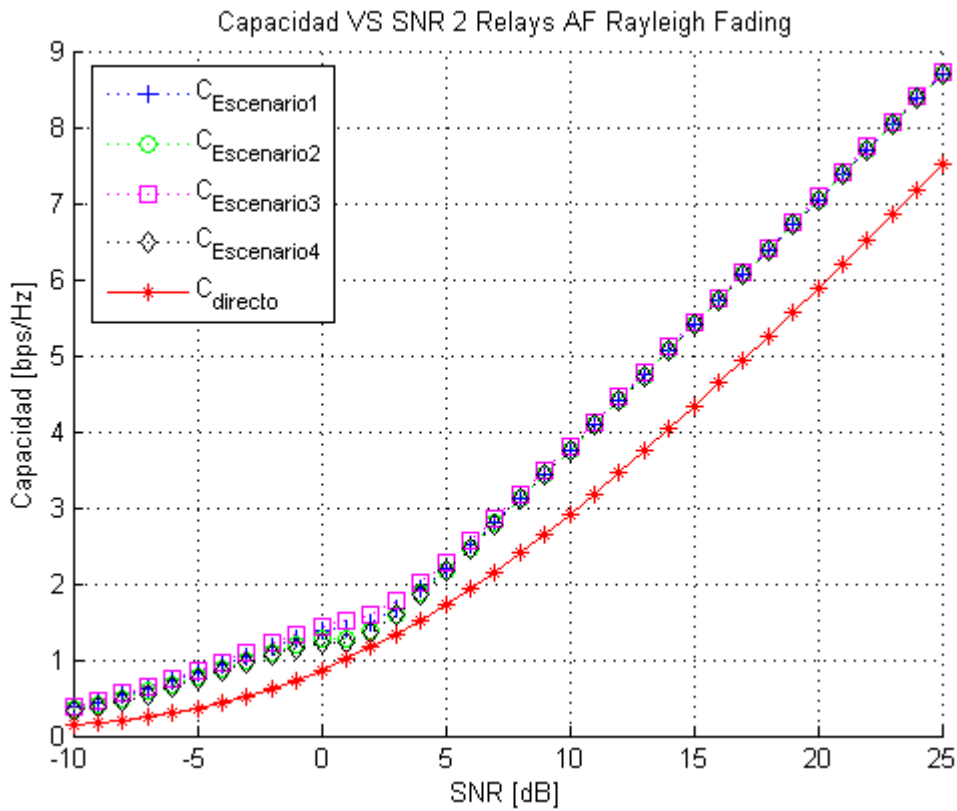


Figura 9.5: Capacidad VS SNR, 2 relays AF, con desvanecimiento

En la Figura 9.5 todos los escenarios superan los valores de capacidad de la transmisión directa. Para valores de SNR superiores a 5 dB, todos los escenarios ofrecen la misma capacidad; las diferencias se aprecian en el entorno de los 0 dB, tal y como se detalla en la Figura 9.6, en esta región, se observa que el Escenario III' ofrece mejores prestaciones que el Escenario I' y éste a su vez mejores que el Escenario II' y que el Escenario IV'.

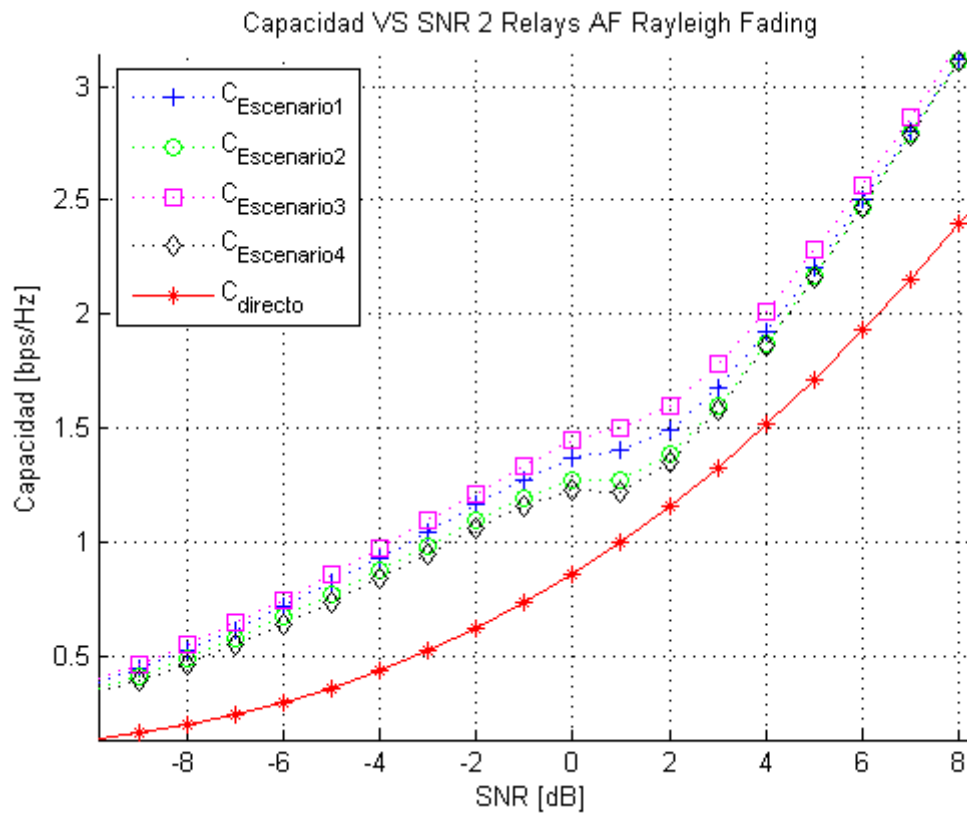


Figura 9.6: Capacidad VS SNR, 2 relays AF, con desvanecimiento

### 9.2.2. Capacidad VS Posición con desvanecimiento

Se han asumido los siguientes valores iniciales:  $\alpha = 4$ ,  $\sigma^2 = 1$ ,  $|h_{ij}| = \sqrt{\frac{1}{d_{ij}^\alpha}}$  y  $P_s = P_r = 1[\text{W}]$ . A partir de la Figura 9.7 se pueden averiguar las posiciones del relay en las que el valor de la capacidad es superior que en la transmisión directa:

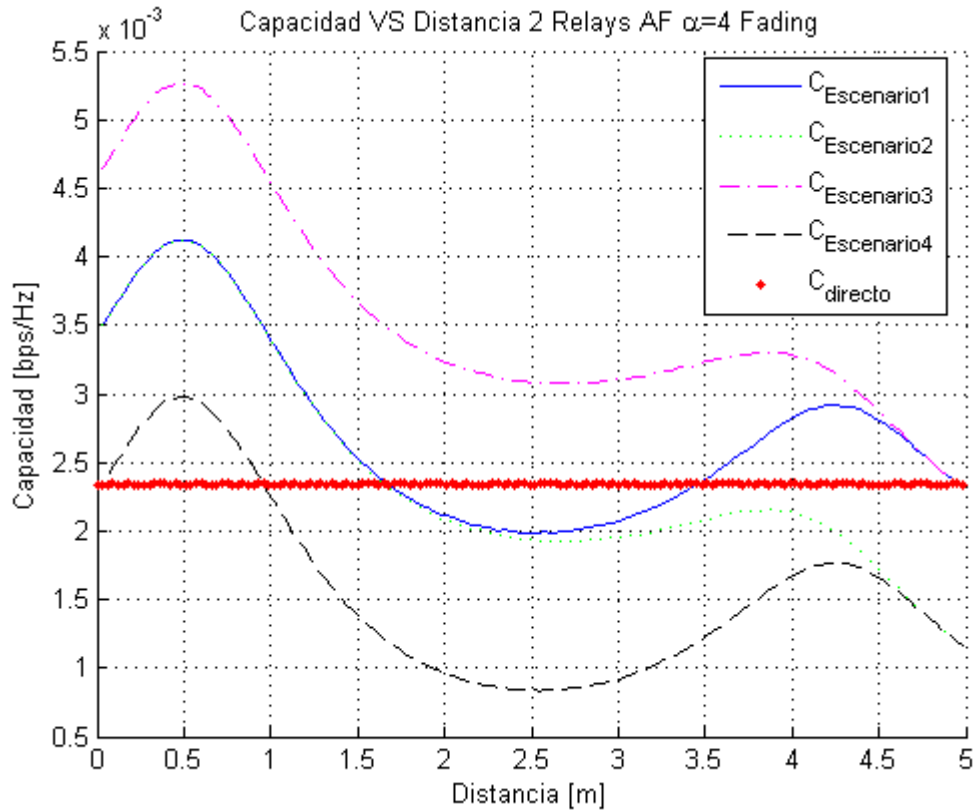


Figura 9.7: Capacidad VS Distancia, relay AF, con desvanecimiento

Para cualquiera que sea el escenario, en entornos cercanos a la fuente, se consigue superar el valor de la capacidad ofrecida por la transmisión directa. Sin embargo, en posiciones intermedias el Escenario III' es el único que lo consigue. En cuanto a las zonas cercanas al destino, los Escenarios I' y III' son los que consiguen ofrecer mejores prestaciones.

ESCENARIOS CON DOS RELAYS, RECEPTOR SUMA EN AMPLITUD	
	<p>Complejo: <math>C_{AF1'_c} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \frac{E}{\sigma_d^2}}{1+A+B} \right]</math></p> <p>Real: <math>C_{AF1'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2}{1+A+B} \right]</math></p> <p>Para todos los escenarios:</p> <p><math>A = \frac{\text{SNR}_{RD}}{1+\text{SNR}_{SR1}}</math>   <math>B = \frac{\text{SNR}_{RD}}{1+\text{SNR}_{SR2}}</math>   <math>E = 2 \cdot P_s \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \Re \{ h_{SR1} \cdot h_{R1D} \cdot h_{SR2}^* \cdot h_{R2D}^* \}</math></p>
	<p>Complejo: <math>C_{AF2'_c} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \frac{E}{\sigma_d^2} + \text{SNR}_{SD}}{1+A+B} \right]</math></p> <p>Real: <math>C_{AF2'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2 + \text{SNR}_{SD}}{1+A+B} \right]</math></p>
	<p>Complejo: <math>C_{AF3'_c} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \frac{E}{\sigma_d^2} + \text{SNR}_{SD} [2+A+B+\text{SNR}_{SD}]}{1+A+B} \right]</math></p> <p>Real: <math>C_{AF3'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2 + \text{SNR}_{SD} [2+A+B+\text{SNR}_{SD}]}{1+A+B} \right]</math></p>
	<p>Complejo: <math>C_{AF4'_c} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \frac{E}{\sigma_d^2}}{1+A+B} \right]</math></p> <p>Real: <math>C_{AF4'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2}{1+A+B} \right]</math></p>

Tabla 9.2: Resumen capacidad 2 relays, receptor suma en amplitud

### 9.3. 2 RELAYS MODO AF:

#### RECEPTOR SUMA EN POTENCIA

##### 9.3.1. Capacidad VS Potencia con desvanecimiento

Se han asumido los siguientes valores:  $\alpha = 4$ ,  $\sigma^2 = 1$ ,  $distancia_{SR, RD} = 0,5$ ,  $|h_{ij}| = \sqrt{\frac{1}{d_{ij}^\alpha}}$ .

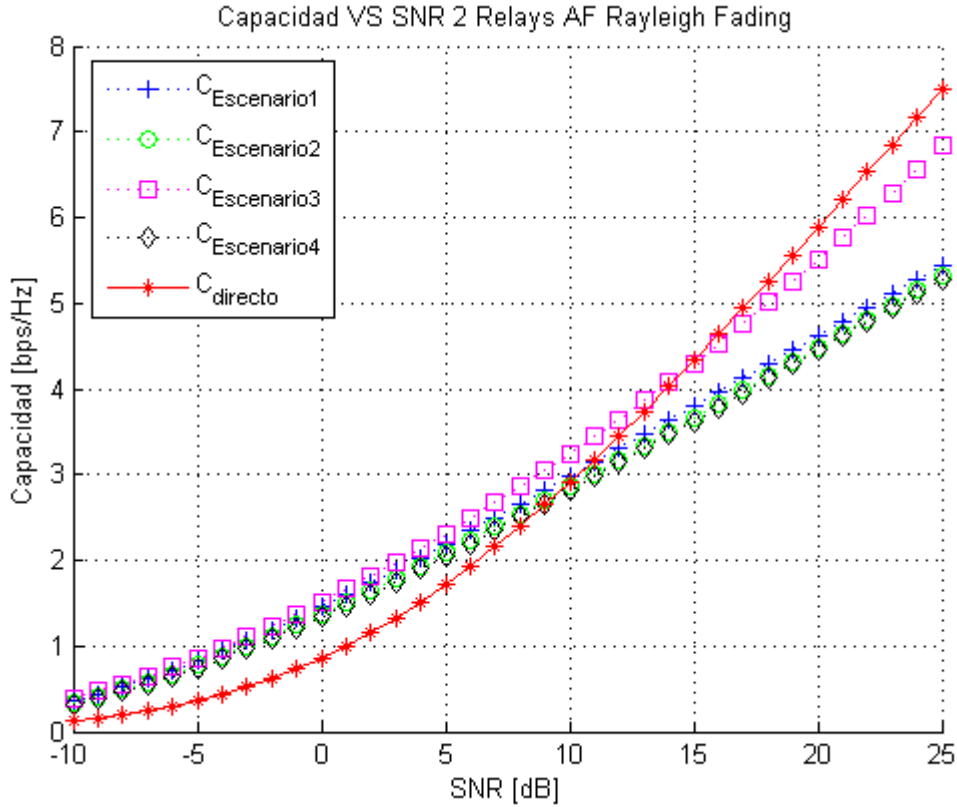


Figura 9.8: Capacidad VS SNR, 2 relays AF, con desvanecimiento

En la Figura 9.8 se observa cómo según el nivel de potencia transmitido aumenta, el valor de la capacidad también aumenta. Dependiendo de la potencia empleada, se supera o no a la transmisión sin relays. En la Figura 9.9 se aprecia con más detalle la existencia de cuatro regiones:

$$\begin{aligned}
 SNR < 14,5dB &\rightarrow C_{Directo} > C_{Esc3} > C_{Esc1} > C_{Esc2} > C_{Esc4} \\
 14,5dB < SNR < 10,5dB &\rightarrow C_{Esc3} > C_{Directo} > C_{Esc1} > C_{Esc2} > C_{Esc4} \\
 10,5dB < SNR < 9,5dB &\rightarrow C_{Esc3} > C_{Esc1} > C_{Directo} > C_{Esc2} > C_{Esc4} \\
 SNR < 9,5dB &\rightarrow C_{Esc3} > C_{Esc1} > C_{Esc2} > C_{Esc4} > C_{Directo}
 \end{aligned}$$

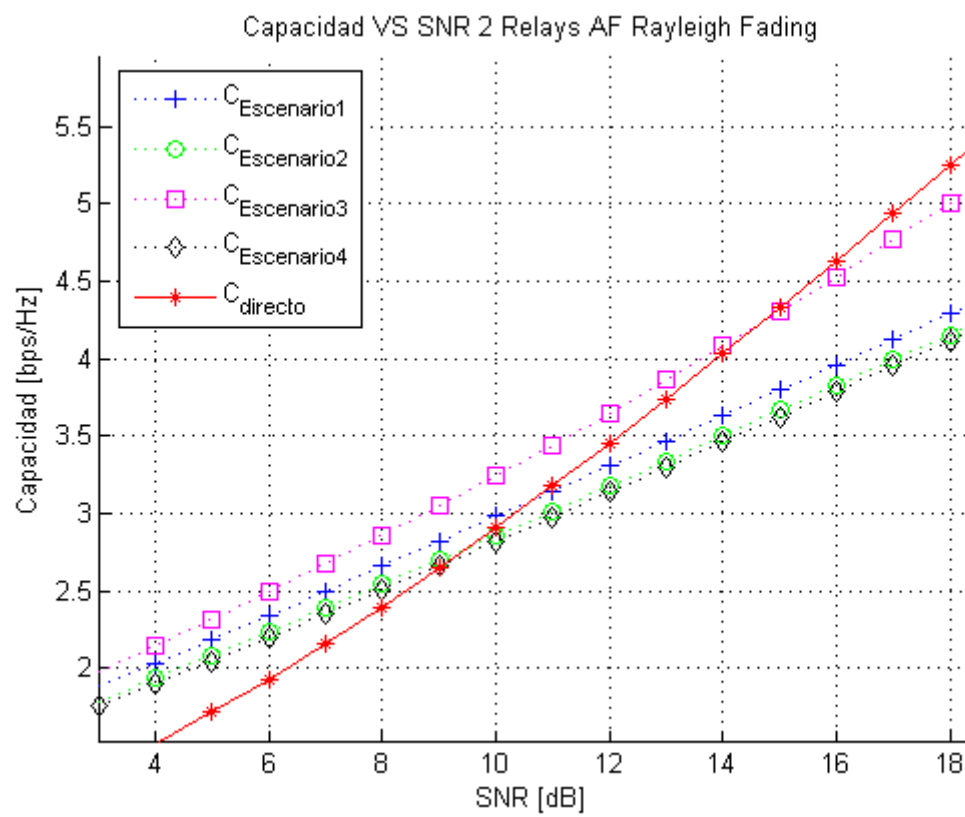


Figura 9.9: Capacidad VS SNR, 2 relays AF, con desvanecimiento

### 9.3.2. Capacidad VS Posición con desvanecimiento

Se han asumido los siguientes valores iniciales:  $\alpha = 4$ ,  $\sigma^2 = 1$ ,  $|h_{ij}| = \sqrt{\frac{1}{d_{ij}^\alpha}}$  y  $P_s = P_r = 1[\text{W}]$ . A partir de la Figura 9.7 se pueden averiguar las posiciones del relay en las que el valor de la capacidad es superior que en la transmisión directa:

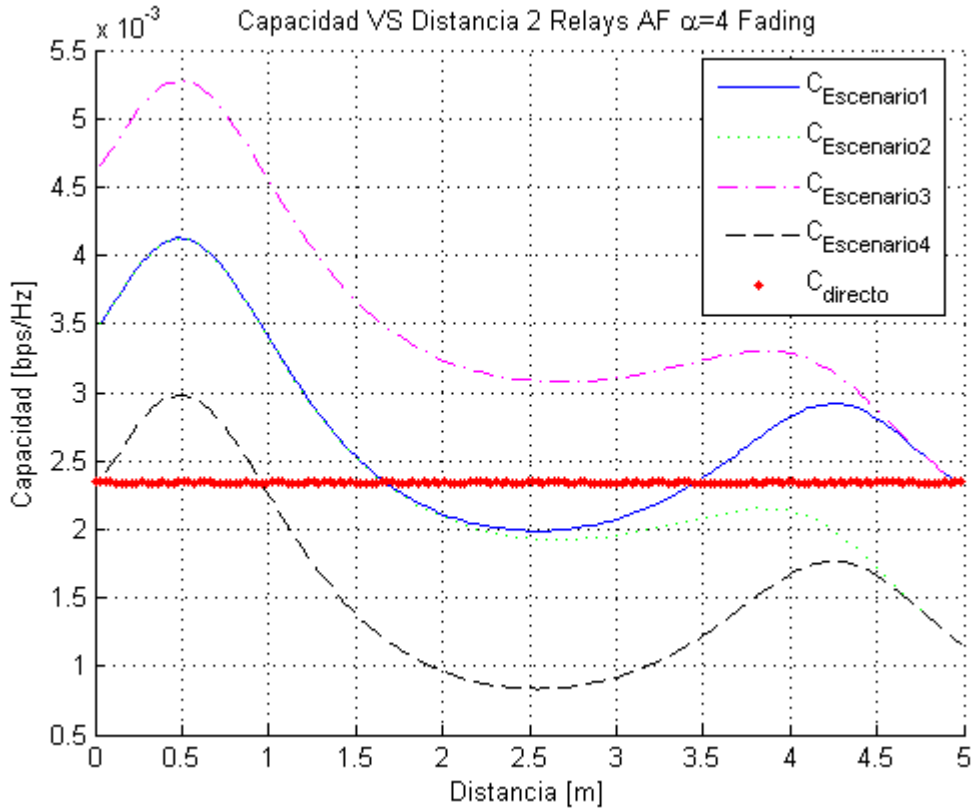


Figura 9.10: Capacidad VS Distancia, relay AF, con desvanecimiento

El resultado obtenido es el mismo que el observado en la Figura 9.7, esto no ha de resultar extraño tras comparar las ecuaciones Ec. 7.15, Ec. 7.32, Ec. 7.50, Ec. 7.67, con Ec. 8.6, Ec. 8.14, Ec. 8.23, Ec. 8.31. Lo que lleva a deducir que el término  $\frac{\sqrt{A \cdot B \cdot \text{SNR}_{SR_i}}}{1+A+B}$  (en el caso de coeficientes de canal complejos:  $\frac{\frac{E}{\sigma^2}}{1+A+B}$ ) no influye en la obtención del valor de la capacidad para los valores simulados. En este caso resultaría indiferente asumir que el receptor suma las señales en amplitud o en potencia. Sin embargo, si  $\alpha = 2$  se pueden atisbar ligeras diferencias en los valores de capacidad, en el caso de sumar en potencia, los valores son en torno a una milésima superiores (por ejemplo, ver Figura 7.5 y la Figura 8.5).



ESCENARIOS CON DOS RELAYS, RECEPTOR SUMA EN POTENCIA	
	$C_{AF1''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2}}{1 + A + B} \right]$ <p>Para todos los escenarios:</p> $A = \frac{\text{SNR}_{RD}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad B = \frac{\text{SNR}_{RD}}{1 + \text{SNR}_{SR2}}$
	$C_{AF2''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \text{SNR}_{SD}}{1 + A + B} \right]$
	$C_{AF3''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2} + \text{SNR}_{SD} [2 + A + B + \text{SNR}_{SD}]}{1 + A + B} \right]$
	$C_{AF4''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2}}{1 + A + B} \right]$

Tabla 9.3: Resumen capacidad 2 relays, receptor suma en potencia

## 9.4. TRABAJOS FUTUROS

El campo de los relays en WiMAX ofrece diversos caminos a explorar, a parte de los estudiados a lo largo del proyecto, se sugieren los siguientes:

- Introducir un grado de libertad más en el escenario en el que se emplean dos relays permitiendo distintas ubicaciones para cada uno de los relays sobre la línea de comunicación entre fuente y destino.
- Investigar el modo *full-duplex*.
- Aumentar el número de saltos en la comunicación entre fuente y destino mediante la inclusión de etapas con relays.

# APÉNDICES



# APÉNDICE A

## Capacidad de canal

En un entorno con ruido Gaussiano, la capacidad de un canal Gaussiano limitado en banda se puede expresar como [\[20\]](#)

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR}) [bps] \quad (\text{A.1})$$

Donde  $B$  es el ancho de banda del canal y  $\text{SNR}$  es la relación entre la señal y el ruido. La Ec. [A.1](#) es llamada como el Teorema de Schannon-Hartley e informa sobre cuál es la tasa máxima a la que la información puede ser enviada entre dos terminales a través de un canal con una probabilidad de error arbitrariamente baja.



## APÉNDICE B

### Capacidad en Transmisión directa sin relay

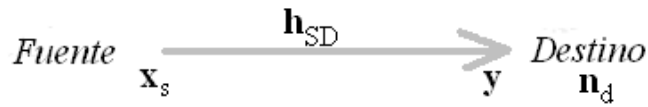


Figura B.1: Transmisión directa

En este caso el relay no interviene en la comunicación, tal y como se observa en la Figura B.1. El valor de la capacidad es:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR}_{SD}), \text{SNR}_{SD} = \frac{P_s \cdot |h_{SD}|^2}{\sigma_d^2} \quad (\text{B.1})$$

Es importante resaltar que en la Ec. B.1 no aparece el término  $\frac{1}{2}$  ya que la comunicación tiene lugar en un único TS.





# APÉNDICE C

## Escenario I: Máximos/mínimos un relay, estrategia AF

En este apéndice se calcula de manera analítica cuáles son los valores mínimos y máximos de capacidad en el Escenario I en el caso de utilizar un relay en modo AF. Para ello, se deriva el valor obtenido de la capacidad y se iguala a cero, posteriormente, evaluando la segunda derivada en los puntos obtenidos se verifica si son mínimos o máximos.

$$C_{AF1} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + SNR_{SD} + \frac{SNR_{SR} \cdot SNR_{RD}}{1 + SNR_{SR} + SNR_{RD}} \right] \quad (C.1)$$

Siendo  $SNR_{SD} = \frac{P_s}{\sigma_d^2 \cdot d_0^\alpha}$   $SNR_{SR} = \frac{P_s}{\sigma_r^2 \cdot d^\alpha}$   $SNR_{RD} = \frac{P_r}{\sigma_d^2 \cdot (d_0 - d)^\alpha}$ . Sustituyendo dichos valores en la Ec. C.1 a la vez que  $P_s = P_r = \sigma_d^2 = \sigma_r^2 = 1$ , queda:

$$C_{AF1} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{1}{d_0^\alpha} + \frac{\frac{1}{d_0^\alpha} \cdot \frac{1}{(d_0 - d)^\alpha}}{\frac{1}{d^\alpha} + \frac{1}{(d_0 - d)^\alpha} + 1} \right] \quad (C.2)$$

Particularizando para un  $\alpha = 2$ , se tiene:

$$C_{AF1} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{1}{d_0^2} + \frac{1}{d^4 - 2d_0^2 d^3 + (2 + d_0^2) d^2 - 2d_0 d + d_0^2} \right] \quad (C.3)$$

Derivando la Ec. C.3 con respecto a  $d$ , se obtiene el siguiente polinomio de tercer grado:  
 $4d^3 - 6d_0 d^2 + 2(2 + d_0^2)d - 2d_0$ .

Tras igualar a cero dicho polinomio, se obtienen las siguientes raíces:

$$x_1 = \frac{d_0}{2} \tag{C.4}$$

$$x_2 = \frac{d_0}{2} - \sqrt{\frac{d_0^2}{4} - 1} \tag{C.5}$$

$$x_3 = \frac{d_0}{2} + \sqrt{\frac{d_0^2}{4} - 1} \tag{C.6}$$

Al realizar la segunda derivada del polinomio y evaluarla en las tres raíces anteriores se verifica que  $x_2$  y  $x_3$  son máximos, mientras que  $x_1$  es un mínimo (tal y como vimos en las simulaciones Fig. 2.5). Resulta interesante destacar que para el caso:  $-2 \leq d_0 \leq 2$  el valor de los máximos ( $x_2$  y  $x_3$ ) y del mínimo ( $x_1$ ) coinciden en  $\frac{d_0}{2}$ .

## Escenario I': Máximos/mínimos dos relays, estrategia AF, suma en amplitud

A continuación, se resuelve analíticamente los valores mínimos y máximos de capacidad en el Escenario I' al emplear la estrategia AF y teniendo en cuenta que en el destino las señales se suman en amplitud. Para ello, se deriva el valor obtenido de la capacidad (utilizando la ecuación resultante tras emplear coeficientes de canal reales) y se iguala a cero, posteriormente, evaluando la segunda derivada en los puntos obtenidos se verifica si son mínimos o máximos.

$$C_{AF1'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{(\sqrt{A \cdot \text{SNR}_{SR1}} + \sqrt{B \cdot \text{SNR}_{SR2}})^2}{1 + A + B} \right] \quad (\text{D.1})$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (\text{D.2})$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (\text{D.3})$$

Siendo  $\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s}{\sigma_d^2 \cdot d_0^\alpha}$        $\text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s}{\sigma_{ri}^2 \cdot d^\alpha}$        $\text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri}}{\sigma_d^2 \cdot (d_0 - d)^\alpha}$ , con  $i = 1, 2$ .  
Sustituyendo dichos valores en la Ec. D.1 a la vez que  $P_s = P_r = \sigma_d^2 = \sigma_r^2 = 1$ , queda, para  $\alpha = 2$ :

$$C_{AF1'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{1}{d_0^2} + \frac{4}{d^4 - 2d_0^2 d^3 + (3 + d_0^2) d^2 - 2d_0 d + d_0^2} \right] \quad (\text{D.4})$$

Derivando la Ec. [D.4](#) con respecto a  $d$ , se obtiene el siguiente polinomio de tercer grado:

$$4d^3 - 6d_0d^2 + 2(3 + d_0^2)d - 2d_0.$$

Tras igualar a cero dicho polinomio y fijar  $d_0 = 5$ , se obtienen las siguientes raíces:

$$x_1 = 2,7672 \tag{D.5}$$

$$x_2 = 0,1993 \tag{D.6}$$

$$x_3 = 4,5335 \tag{D.7}$$

Al realizar la segunda derivada del polinomio y evaluarla en las tres raíces anteriores se verifica que  $x_2$  y  $x_3$  son máximos, mientras que  $x_1$  es un mínimo (tal y como vimos en las simulaciones [Fig. 7.4](#)).

# APÉNDICE E

## Escenario I'': Máximos/mínimos dos relays, estrategia AF, suma en potencia

Tal y como se hizo en el Apéndice C, se resuelve analíticamente los valores mínimos y máximos de capacidad en el Escenario I'' al emplear la estrategia AF y teniendo en cuenta que en el destino las señales se suman en potencia. Para ello, se deriva el valor obtenido de la capacidad y se iguala a cero, posteriormente, evaluando la segunda derivada en los puntos obtenidos se verifica si son mínimos o máximos.

$$C_{AF1''} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \text{SNR}_{SD} + \frac{A \cdot \text{SNR}_{SR1} + B \cdot \text{SNR}_{SR2}}{1 + A + B} \right] \quad (\text{E.1})$$

$$A = \frac{\text{SNR}_{R1D}}{1 + \text{SNR}_{SR1}} \quad (\text{E.2})$$

$$B = \frac{\text{SNR}_{R2D}}{1 + \text{SNR}_{SR2}} \quad (\text{E.3})$$

Siendo  $\text{SNR}_{SD} = \frac{P_s}{\sigma_d^2 \cdot d_0^\alpha}$   $\text{SNR}_{SRi} = \frac{P_s}{\sigma_{ri}^2 \cdot d^\alpha}$   $\text{SNR}_{RiD} = \frac{P_{ri}}{\sigma_d^2 \cdot (d_0 - d)^\alpha}$ , con  $i = 1, 2$ .  
 Sustituyendo dichos valores en la Ec. E.1 a la vez que  $P_s = P_r = \sigma_d^2 = \sigma_r^2 = 1$ , queda, para  $\alpha = 2$ :

$$C_{AF1'_r} = \frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{1}{d_0^2} + \frac{2}{d^4 - 2d_0^2 d^3 + (3 + d_0^2) d^2 - 2d_0 d + d_0^2} \right] \quad (\text{E.4})$$

Derivando la Ec. [E.4](#) con respecto a  $d$ , se obtiene el siguiente polinomio de tercer grado:

$$4d^3 - 6d_0d^2 + 2(3 + d_0^2)d - 2d_0.$$

Dicho polinomio es el mismo obtenido en el Apéndice C, por tanto los valores de los máximos y mínimo coinciden, para  $d_0 = 5$ :

$$x_1 = 2,7672 \tag{E.5}$$

$$x_2 = 0,1993 \tag{E.6}$$

$$x_3 = 4,5335 \tag{E.7}$$

# Bibliografía

- [1] J.N.Laneman, D.N.C.Tse and G.W.Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 50(12):3062–3080, 2004.
- [2] E. Van Der Meulen. Three-terminal communication channels. *Advances in Applied Probability*, 3(1):120–154, 1971.
- [3] T.M.Cover and A.A El Gamal. Capacity theorems for the relay channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 25(5):572–584, 1979.
- [4] R.U.Nabar, H.Böleskei and F.W Kneubühler. Fading relay channels: performance limits and space-time signal design. *IEE. J. Sel Areas Communication*, 22(6):1099–1109, 2004.
- [5] A.Nosratinia, T.E Hunter and A.Hedayat. Cooperative communications in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 42(10):74–80, 2004.
- [6] IEEE 802.16e task group. Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems. *Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, 802.16e-2005 edition*, Amendment(2), 2006.
- [7] Eurgen Borcoci. WiMAX technologies: Architectures, protocols, resource management and applications. *CTRQ Conference*, page 34, 2008.
- [8] C.Hoymann, M.Dittrich and S.Gobbels. Dimensioning and capacity evaluation of cellular multihop WiMAX networks. *Proceedings of IEEE Mobile WiMAX*, 2007.
- [9] <http://www.ieee802.org/16/relay/>.

- 
- [10] [http://www.ieee802.org/16/relay/contrib/C80216j-06\\_034.pdf](http://www.ieee802.org/16/relay/contrib/C80216j-06_034.pdf).
  - [11] T.M Cover and J.A Thomas. *Elements of information theory*. John Wiley and Sons, 2006.
  - [12] Bharti Upae and Mythri Hunukumbure. Dimensioning and cost analysis of multihop relay-enabled WiMAX networks. *FUJITSU Sci.Tech.J.*, 44(3):303–317, 2008.
  - [13] J.Laneman, D.N.C.Tse and G.W.Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 50(12):3062–3080, 2004.
  - [14] Charan Langton. All about modulation, 2006. <http://www.complextoreal.com/chapters/mod1.pdf>.
  - [15] Adrián Agustín de Dios. Relay-assisted transmission and radio resource management for wireless networks, 2008.
  - [16] M. Gastpar and M. Vetterli. On the capacity of large gaussian relay networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(3):765–779, 2005.
  - [17] B. Schein and R. Gallager. The gaussian parallel relay network. In *Proceedings International Symposium on Information Theory*, June 2000.
  - [18] I. Maric and R. Yates. Forwarding strategies for gaussian parallel-relay networks. In *Proceedings International Symposium on Information Theory*, June 2004.
  - [19] G. Kramer, M. Gastpar and P. Gupta. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(9):3037–3063, 2005.
  - [20] A.B.Carlson. *Communication systems*. New York: McGraw-Hill, 1975.